

**Wacław GAWĘDZKI**

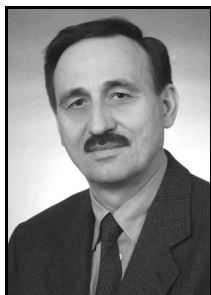
AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA, KATEDRA METROLOGII, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

**Analiza wpływu drgań gruntu na odkształcenia rurociągów w warunkach ich dodatkowego obciążenia statycznego**

Dr inż. Wacław GAWĘDZKI

Ukończył studia na kierunku Elektrotechnika w Akademii Górniczo-Hutniczej w roku 1979 w zakresie automatyki i metrologii elektrycznej. W roku 1988 uzyskał stopień doktora nauk technicznych w zakresie elektrotechniki. Zajmuje się zagadnieniami związanymi z pomiarami wielkości nieelektrycznych, właściwościami dynamicznymi aparatury pomiarowej, problematyką kalibracji i autokalibracji torów pomiarowych oraz kompresji sygnałów pomiarowych.

e-mail: waga@agh.edu.pl

**Streszczenie**

W artykule przedstawiono metodę analizy oraz wyniki badań eksperymentalnych wpływu drgań gruntu na odkształcenia rurociągów poddanych obciążeniom statycznym o zróżnicowanej wielkości. Zaproponowana w artykule czasowo-częstotliwościowa metoda transformacji Fouriera *STFT*, może stanowić podstawę wnioskowania odnośnie wpływu drgań pochodzących od zewnętrznych oddziaływań parasejsmicznych w procesie zmęczenia liniowych obiektów budowlanych.

**Słowa kluczowe:** drgania parasejsmiczne, odkształcenia rurociągów, analiza czasowo-częstotliwościowa.

**Analysis of ground vibrations influence on pipelines deformations in additional static tension conditions****Abstract**

This paper presents results of experimental research and method of analysis of ground vibrations influence on deformations of pipelines under static load of different values. Time-frequency method is proposed in this paper. It could be a basis for inference about influence of vibrations coming from external paraseismic effects during pipelines fatigue process. Measurement stand, as well as research and analyzing method of data obtained during measurement process are shown in this paper. For analysis of non-stationary seismic phenomenon, a time-frequency, short-time Fourier transform method has been used (*STFT*). This article shows that force of pipeline's static tension has major impact on pipeline's reaction on dynamic ground vibrations effect. The analyzing method is a good tool for detection of such influences. Moreover low frequency character of pipeline – ground influence has been shown in this article. It is especially dangerous in situation of fatigue process of pipeline's material.

**Keywords:** paraseismic vibrations, pipelines deformations, time-frequency transform.

**1. Wprowadzenie**

Badania wpływu wstrząsów i drgań gruntu w połączeniu z obciążeniami statycznymi działającymi na liniowe obiekty budowlane (rurociągi gazowe, wodociągowe, kanalizacyjne, ciepłociągi) są niezbędne do oceny stopnia zagrożenia bezpieczeństwa rurociągów położonych na terenach o niestabilnym podłożu (np. tereny górnicze, obszary nasilonego ruchu komunikacyjnego itp.) [1, 2, 3]. Obciążenia rurociągów powodują głównie statyczne siły i momenty powstające pod wpływem działania sił tarcia na styku rurociąg – grunt oraz składowa dynamiczna, na którą składają się impulsy dynamiczne pochodzące od wstrząsów o genezie parasejsmicznej. Nieregularne i o losowym przebiegu obciążenia dynamiczne mogą być przyczyną niskocyklowego zmęczenia materiału, czego skutkiem może być rozwój i propagacja mikropręknięć prowadzących do awarii rurociągu.

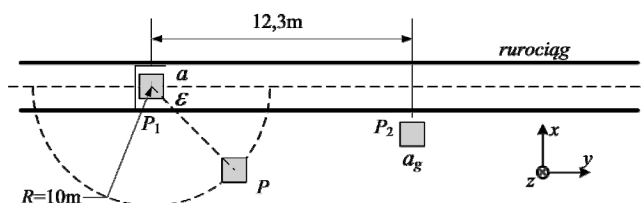
Z drugiej strony przenoszone na grunt i rurociąg drgania pochodzące od wstrząsów wpływają na zmiany wartości sił tarcia, powodując zmienność obciążenia zewnętrznego konstrukcji.

Zastosowanie metod czasowo-częstotliwościowych w badaniach takich zjawisk daje możliwość nieparametrycznej analizy sygnałów parasejsmicznych. Jest to szczególnie istotne ze względu na trudności w określaniu częstotliwości rezonansowych układów o parametrach rozłożonych, do jakich niewątpliwie należą liniowe obiekty budowlane (w tym rurociągi). Rezonansowe właściwości układów decydują bowiem 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. Wykorzystując możliwości transformacji *STFT* (Short Time Fourier Transform) można określić uogólnione wartości chwilowe amplitudy, częstotliwości oraz opóźnienia grupowego, które lepiej pozwalają scharakteryzować badany obiekt mechaniczny, na przykład poprzez wyznaczenie szybkości i wielkości zmian częstotliwości i amplitudy, czy też opóźnień czasowych w rozchodzeniu się fali sejsmicznej [4, 5, 6].

W artykule przeprowadzono weryfikację skuteczności czasowo-częstotliwościowej, krótkoczasowej transformacji Fouriera *STFT* do analizy zarejestrowanych w trakcie eksperymentu pomiarowego sygnałów odkształceń rurociągu, oraz przyspieszeń drgań rurociągu i gruntu wywołanych wymuszonymi drganiami parasejsmicznymi występującymi na tle obciążeń statycznych o zróżnicowanej wielkości.

**2. Opis stanowiska i badań eksperymentalnych**

Celem przeprowadzonego eksperymentu było określenie zmian odkształceń gazociągu pod wpływem działania zewnętrznych impulsów dynamicznych. Zadawane w trakcie eksperymentu udary, które można interpretować jako fale parasejsmiczne pochodzenia górniczego, otrzymywano zrzucając z wysokości 3 m ciężar 12 kN. Zaplanowane badania uwzględniały quasi-statyczny charakter obciążenia gazociągu, powstały wskutek obniżenia terenu 2-giej kategorii górniczej, z jednoczesnym zadawaniem zewnętrznych wymuszeń dynamicznych [1]. W wyniku oddziaływania wymuszonych drgań na podłożu otaczające rurociąg otrzymywano i rejestrowano sygnały odkształcenia rurociągu. Równocześnie mierzono i rejestrowano odpowiedzi dynamiczne przyspieszeń drgań gruntu i gazociągu w jednostkach przyspieszenia ziemskiego.



Rys. 1. Schemat sytuacyjny stanowiska do eksperymentalnych badań rurociągu  
Fig. 1. Stand diagram for experimental researches of pipelines

Na rysunku 1 przedstawiono schemat stanowiska do badań eksperymentalnych dynamicznych obciążeń rurociągu gazowego. Przyklejone na gazociągu tensometry w punkcie pomiarowym  $P_1$  i połączone w zespoły mostków tensometrycznych pozwoliły na zarejestrowanie wartości kierunkowych odkształceń  $\varepsilon_x(t)$ ,  $\varepsilon_y(t)$ ,  $\varepsilon_z(t)$ , powstających w przekrojach rurociągu.

Zastosowany system pomiarowy umożliwiał jednoczesny pomiar i rejestrację przyspieszeń drgań rurociągu  $a_x(t)$ ,  $a_y(t)$ ,  $a_z(t)$  generujących kierunkowe składowe odkształcenia. Układ pomiaru odkształceń dynamicznych nie wyklucza równoczesnego pomiaru składowych statycznych, jednakże w razie potrzeby mogą one być równoważone wstępnie przed rozpoczęciem pomiaru lub mogą być usuwane z już zarejestrowanych wyników pomiarowych. Bezpośrednio w pobliżu gazociągu w punkcie pomiarowym  $P_2$ , umiejscowiono akcelerometr 3-osiowy do pomiaru składowych przyspieszenia kierunkowego gruntu  $a_{gx}(t)$ ,  $a_{gy}(t)$ ,  $a_{gz}(t)$ . Dokładny opis systemu pomiarowego przedstawiono w pracy [6]. 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  $P_1$ . Zmiana położenia punktu  $P$  umożliwia zmianę odległości punktu  $P_2$  względem punktu  $P$  przy nieziennej odległości punktu  $P_1$  względem  $P$ . Eksperymenty przeprowadzone były dla różnych wartości siły naciągu statycznego rurociągu, który zadawany był poprzez specjalny siłownik. Na rysunku zaznaczono sposób przyjęcia układu współrzędnych względem rurociągu.

### 3. Metoda analizy wyników eksperymentów

Celem eksperymentu pomiarowego było określenie wpływu oddziaływań dynamicznych drgań gruntu na rurociągi w warunkach ich dodatkowego naciągu statycznego. Jako sygnał wymuszający przyjęto przyspieszenie drgań gruntu  $a_g(t)$ , a miarą deformacji rurociągu są jego przyspieszenie drgań  $a(t)$  i odkształcenie powierzchni  $\varepsilon(t)$ , wszystkie wyznaczane w trójosiowym układzie odniesienia  $xyz$ .

Dla zarejestrowanych sygnałów odkształceń i przyspieszeń drgań wyznaczono widma częstotliwościowe za pomocą krótkoczasowej transformaty Fouriera *STFT* wykorzystując w tym celu oprogramowanie Matlab & Simulink [7, 8]. Skorzystano w tym celu z funkcji *spectrogram* pakietu Matlab, a do wizualizacji wyników zastosowano funkcję *imagesc*. Dla procedury *spectrogram* przyjęto standardowo okno Hanninga. Wszystkie sygnały zostały wstępnie poddane operacji odfiltrowania zakłóceń i usunięcia składowej stałej. Krótkoczasową transformatę Fouriera *STFT* sygnałów wyznaczono na podstawie zależności [7]:

$$STFT\{u(t)\} \equiv U(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} u(\tau) \cdot w(\tau - t) \cdot e^{-j2\pi f\tau} d\tau, \quad (1)$$

gdzie:

$u(t)$  – przetwarzany sygnał,  
 $U(t, f)$  – zespolona transformata *STFT* sygnału  $u(t)$ ,  
 $w(\tau - t)$  – funkcja okna czasowego.

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 osi "x":

$$|STFT\{\varepsilon_x(t)\}| \equiv E_x(t, f), \quad (2)$$

$$|STFT\{a_x(t)\}| \equiv A_x(t, f), \quad (3)$$

$$|STFT\{a_{gx}(t)\}| \equiv A_{gx}(t, f), \quad (4)$$

przy czym podobnie przyjęto oznaczenia dla modułów transformat sygnałów w osiach "y" i "z", a różnica dotyczy symboli indeksów określających nazwę osi.

Do analizy modułów czasowo-częstotliwościowych transformat sygnałów odkształceń (2), przyspieszeń (3) rurociągu i przyspieszeń drgań gruntu (4) wykonano przekroje obrazów trójwymiarowych, uzyskując dwuwymiarowe charakterystyki modułów transformat w funkcji częstotliwości, każda dla ustalonego czasu, dla którego osiągnięta jest maksymalna wartość modułu transformaty poszczególnego sygnału. Matematyczny zapis tych charakterystyk dla osi "x" ma postać:

$$E_x(f) = E_x(t_{xe}, f) \quad \text{dla } t_{xe} = \arg\{\max_t \max_f E_x(t, f)\}, \quad (5)$$

$$A_x(f) = A_x(t_{xa}, f) \quad \text{dla } t_{xa} = \arg\{\max_t \max_f A_x(t, f)\}, \quad (6)$$

$$A_{gx}(f) = A_{gx}(t_{gxa}, f) \quad \text{dla } t_{gxa} = \arg\{\max_t \max_f A_{gx}(t, f)\}, \quad (7)$$

a dla pozostałych osi "y" i "z" w równaniach (5) do (7) zmianie ulegną jedynie symbole indeksów określające nazwę poszczególnych osi.

W trakcie przeprowadzania kolejnych eksperymentów w warunkach terenowych niepowtarzalny jest sposób zrzucań ciężaru, jego ułożenie względem gruntu w chwili uderzenia oraz pojawia się efekt "utwardzania" gruntu po każdym kolejnym uderzeniu. Powoduje to, że podczas kolejnych eksperymentów wartości przyspieszeń drgań gruntu, stanowiące wymuszenie, mają różne wartości. W celu rozwiązania tego problemu wprowadzono normowanie sygnałów stanowiących reakcję rurociągu, przy czym jako wartości normujące przyjęto maksymalne wartości amplitudy sygnałów przyspieszenia drgań gruntu  $a_g(t)$  w poszczególnych osiach, przykładowo dla osi "x" wartość normująca  $K_{gx}$  wynosi:

$$K_{gx} = \max_t |a_{gx}(t)|. \quad (8)$$

Unormowane charakterystyki modułów transformat (5)–(7) w funkcji częstotliwości przy uwzględnieniu (8) przyjmują dla wszystkich osi  $x, y$  oraz  $z$  postać:

$$\frac{E_x(f)}{K_{gx}}, \quad \frac{E_y(f)}{K_{gy}}, \quad \frac{E_z(f)}{K_{gz}} \quad (9)$$

$$\frac{A_x(f)}{K_{gx}}, \quad \frac{A_y(f)}{K_{gy}}, \quad \frac{A_z(f)}{K_{gz}} \quad (10)$$

$$\frac{A_{gx}(f)}{K_{gx}}, \quad \frac{A_{gy}(f)}{K_{gy}}, \quad \frac{A_{gz}(f)}{K_{gz}} \quad (11)$$

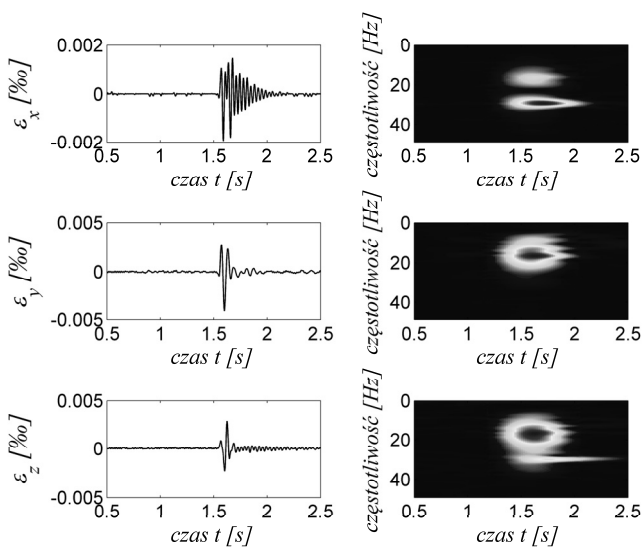
### 4. Analiza danych pomiarowych

Na rysunkach 2, 3 i 4 przedstawiono przebiegi przykładowych sygnałów odkształceń  $\varepsilon_x(t)$ ,  $\varepsilon_y(t)$ ,  $\varepsilon_z(t)$  rurociągu wyrażone w [%], oraz przyspieszeń drgań rurociągu  $a_x(t)$ ,  $a_y(t)$ ,  $a_z(t)$  i gruntu  $a_{gx}(t)$ ,  $a_{gy}(t)$ ,  $a_{gz}(t)$  wyrażone w jednostce przyspieszenia ziemskiego [g] zarejestrowane w trakcie eksperymentu.

Oprócz przebiegów czasowych pokazano również na rysunkach obrazy czasowo-częstotliwościowe modułów transformat *STFT* sygnałów zgodnie z (2) - (4).

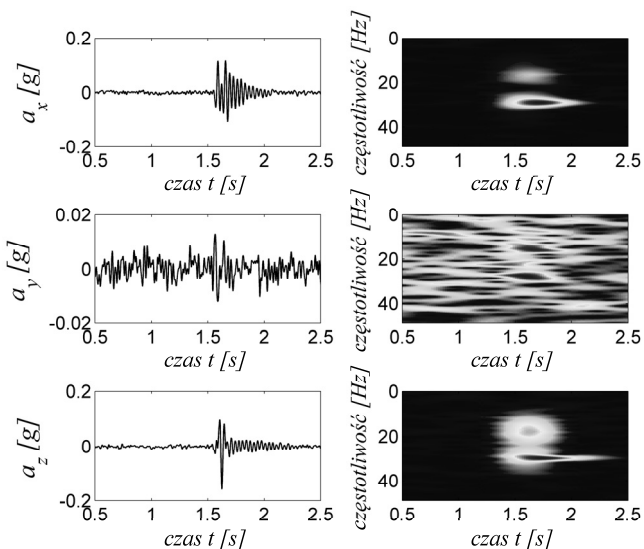
Na rysunkach 5, 6 i 7 przedstawiono dla sygnałów w osi "x" unormowane przebiegi widmowe odkształceń rurociągu zgodnie z zależnościami (5) i (9), przyspieszeń rurociągu zgodnie z zależnościami (6) i (10) oraz przyspieszeń drgań gruntu zgodnie z zależnościami (7) i (11), wszystkie dla ustalonego czasu zgodnie z zależnościami (5) do (7).

Sygnały rejestrowano z częstotliwością próbkowania  $f_p=1200$  Hz, co przy liczbie 4000 próbek daje czas pojedynczej rejestracji  $T=3,33(3)$  s.



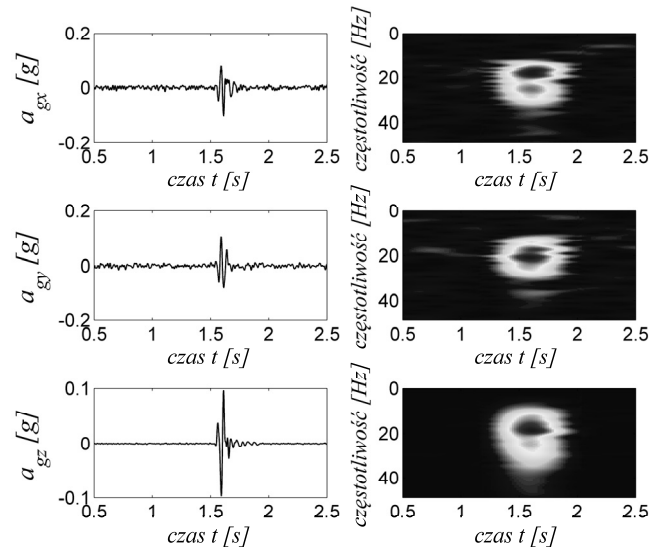
Rys. 2. Przebiegi sygnałów odkształceń rurociągu w trzech osiach oraz moduły ich transformat *STFT* zgodnie z (2)

Fig. 2. Strain signal waveforms of pipeline deformations and modulus of their *STFT* transform according to (2)



Rys. 3. Przebiegi sygnałów przyspieszeń drgań rurociągu w trzech osiach oraz moduły ich transformat *STFT* zgodnie z (3)

Fig. 3. Acceleration signal waveforms of pipeline vibrations and modulus of their *STFT* transforms according to (3)

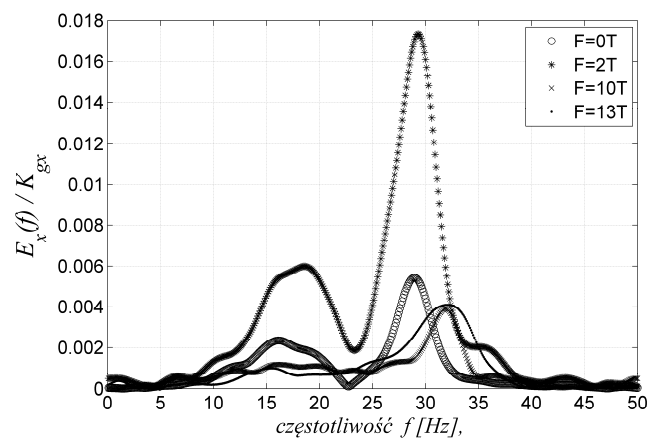


Rys. 4. Przebiegi sygnałów przyspieszeń drgań gruntu w trzech osiach oraz moduły ich transformat *STFT* zgodnie z (4)

Fig. 4. Acceleration signal waveforms of ground vibrations and modulus of their *STFT* transforms according to (4)

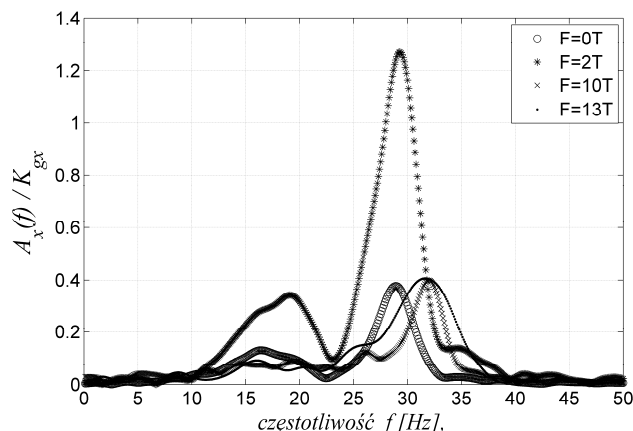
W artykule przedstawiono wyniki badań wpływu naciągu statycznego na sposób oddziaływania dynamicznego drgań gruntu na odkształcenia rurociągu. Na rysunkach 5 i 6 pokazano wartości odkształceń i przyspieszeń drgań rurociągu występujące pod wpływem drgań gruntu w obecności różnych wartości sił naciągu statycznego (od 0 T do 13 T). Należy zauważyć, że największe wartości odkształceń i przyspieszeń rurociągu występują dla sił naciągu  $F=2$  T, po czym zarówno dla sił naciągu większych od tej wartości oraz przy braku naciągu statycznego, reakcja rurociągu wyrażana poprzez jego odkształcenia i przyspieszenia drgań maleje.

Porównując przedstawione na rysunkach 6 i 7 unormowane przebiegi przyspieszeń rurociągu i gruntu można zauważyć, że wyrażona przez przyspieszenia drgań reakcja rurociągu wykazuje większe wartości, niż wywołujące je przyspieszenia drgań gruntu (ewidentny efekt rezonansu). Należy również zauważyć, iż rezonans ten jest szczególnie widoczny dla ściśle określonej wartości siły naciągu statycznego rurociągu  $F=2$  T, dla innych wartości sił naciągu efekt ten silnie się osłabia.



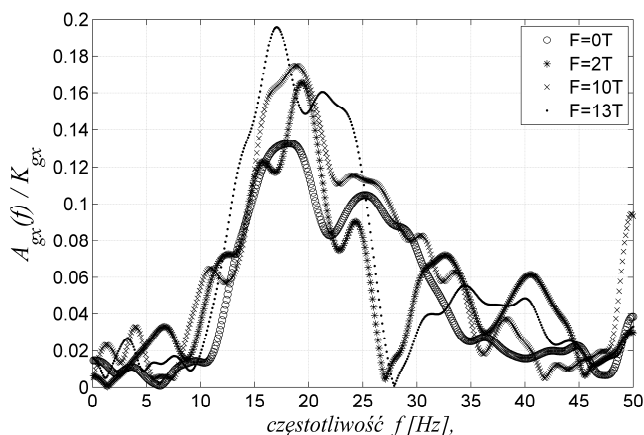
Rys. 5. Unormowane przebiegi widmowe odkształceń rurociągu w osi "x" dla ustalonego czasu, zgodnie z zależnościami (5) i (9)

Fig. 5. Normalized strain signals of pipeline spectrum in the "x" axis for fixed time according to (5) and (9)



Rys. 6. Unormowane przebiegi widmowe przyspieszeń rurociągu w osi "x" dla ustalonego czasu, zgodnie z zależnościami (6) i (10)

Fig. 6. Normalized pipeline acceleration spectrum in the "x" axis for fixed time according to (6) and (10)



Rys. 7. Unormowane przebiegi widmowe przyspieszeń gruntu w osi "x" dla ustalonego czasu, zgodnie z zależnościami (7) i (11)

Fig. 7. Normalized ground vibration acceleration spectrum in the "x" axis for fixed time according to (7) and (11)

Widmo drgań gruntu, niezależnie od wartości sił naciągu osiąga maksimum w otoczeniu 16 Hz – 18 Hz, natomiast reakcja rurociągu wyrażona przez widmo jego odkształceń i drgań posiada dominujące wartości dla częstotliwości około 30 Hz oraz drugi rezonans, o około 3 – krotnie mniejszej wartości dla częstotliwości zbliżonej do 18 Hz, odpowiadającej dominującej częstotliwości wymuszenia.

Omówione efekty potwierdzają pełne charakterystyki widma przedstawione na rysunkach 2, 3 i 4. Szczególnie interesujący jest przedstawiony na rysunku 2 i 3 sposób reakcji rurociągu w osi "y". Pomimo, że w kierunku tym wartości przyspieszenia  $a_y(t)$  (rys. 3) przyjmują bardzo małe wartości, odkształcenie  $\varepsilon_y(t)$  (rys. 2) przyjmuje pomimo to wartości istotne, porównywalne z wartościami odkształceń w pozostałych osiach.

Wartości częstotliwości rezonansowych wskazują na niskoczęstotliwościowy charakter oddziaływań rurociągu z gruntem, szczególnie groźnych w przypadku zjawiska zniszczenia zmęczeniowego materiału rurociągu na terenach eksploatacji górniczej.

Na rysunkach 2 i 3 wyraźnie widoczny jest efekt występowania dwóch częstotliwości dominujących w widmie o wartościach zbliżonych do 18 Hz i 30 Hz, podczas gdy częstotliwość drgań wymuszających jest rzędu 18 Hz (rys. 4). Efekt ten jest najprawdopodobniej wynikiem oddziaływania wzdłużnej fali sejsmicznej,

powodującej dodatkowe efekty rezonansowe dla kierunku poziomego, prostopadłego względem osi rurociągu (oś "x").

## 5. Wnioski

Przeprowadzone badania pozwoliły na uzyskanie charakterystyk wymuszanego procesu parasejsmicznego głównie w postaci niestacjonarnego rozkładu gęstości widmowych.

W artykule pokazano, że wartość siły statycznego naciągu rurociągu ma istotny wpływ na jego reakcję na dynamiczne oddziaływania drgań gruntu, a zastosowana metoda analizy daje skuteczne narzędzie detekcji oddziaływań tego typu. Wykazano również niskoczęstotliwościowy charakter oddziaływań rurociągu z gruntem, szczególnie groźnych w przypadku zjawiska zniszczenia zmęczeniowego materiału rurociągu.

W trakcie przeprowadzania kolejnych eksperymentów z wymuszonym procesem parasejsmicznym w warunkach terenowych niepowtarzalny jest sposób zrzucania ciężaru, jego ułożenie względem gruntu w chwili uderzenia oraz pojawia się efekt "utwardzania" gruntu i w związku z tym zmiana jego gęstości po każdym kolejnym uderzeniu. Przeprowadzane eksperymenty z wymuszonymi oddziaływaniami udarowymi mają w związku z tym charakter niepowtarzalny, co należy uwzględnić przy ewentualnym doborze innych metod badawczych.

## 6. Literatura

- [1] Tarnowski J. i inni: Optymalizacja metod obliczeniowych oraz modernizacja technologii budowy i systemu eksploatacji sieci gazowych na terenach szkód górniczych w aspekcie bezpieczeństwa użytkownika. Sprawozdanie z Projektu Badawczego KBN Nr 9T12A04812, (2000), AGH Kraków.
- [2] Dulińska J., Zięba A.: Wpływ wstrząsów górniczych i odstrzałów w kamieniołomach na odpowiedź dynamiczną gazociągu. Czasopismo Techniczne, Budownictwo, (2007), z.2-B, 19-28.
- [3] Dulińska J.: Odpowiedź dynamiczna budowli wielopodporowych na nierównomierne wymuszenie parasejsmiczne pochodzenia górniczego. Monografia 338, seria: Inżynieria Łądowa, 2006, Politechnika Krakowska, 178s.
- [4] Gawędzki W.: Weryfikacja wybranych matematycznych metod oceny wpływu drgań gruntu na odkształcenia rurociągów. Materiały XVII Sympozjum „Modelowanie i symulacja systemów pomiarowych”, Wydawnictwo KM AGH, 2009, 135–140.
- [5] Gawędzki W., Tarnowski J.: Badania wpływu drgań komunikacyjnych na obciążony gazociąg stalowy. Problemy Eksploatacji, 2009, nr 3, 65–74.
- [6] Gawędzki W., Tarnowski J.: System diagnozowania i monitoringu statycznych i dynamicznych stanów odkształceń gazociągów eksploatowanych w warunkach niestabilnego środowiska. Kwartalnik PAN, Zagadnienia Eksploatacji Maszyn, (1999), nr.4(120).
- [7] Zieliński T. P.: Cyfrowe przetwarzanie sygnałów. Od teorii do zastosowań. WKiŁ, 2005, Warszawa.
- [8] MATLAB & SIMULINK for Windows – User's Guide The MathWorks, Inc.
- [9] Kasina Z.: Modelowanie sejsmiczne. Wyd. Instytutu GSMiE PAN, Kraków, 2003.
- [10] Okamoto S.: Introductions to Earthquake Engineering, 1984, University of Tokyo Press.

otrzymano / received: 17.05.2010

przyjęto do druku / accepted: 02.07.2010

artykuł recenzowany