



Fundacja Polskiego Związku Inżynierów i Techników Budownictwa
Czasopismo „Inżynieria i Budownictwo”

DYPLOM

w konkursie autorskim artykułów wyróżniających się
ujęciem tematyki i przydatnością praktyczną, opublikowanych
na łamach miesięcznika „Inżynieria i Budownictwo” w roku 2023

Rada Programowa Czasopism i Wydawnictw PZITB

przyznała

II NAGRODĘ

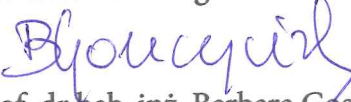
za artykuł pt. „Analiza numeryczna zachowania się gazociągu podziemnego
w warunkach zadanych wymuszeń dynamicznych” (nr 11-12/2023).

Laureatami zostali

mgr inż. PAWEŁ OKROJ
prof. dr hab. inż. JACEK HULIMKA

SERDECZNIE GRATULUJEMY

W imieniu Kolegium Redakcyjnego


Prof. dr hab. inż. Barbara Goszczyńska
Redaktor naczelna

W imieniu Rady Programowej


Prof. dr hab. inż. Anna Halicka
Przewodnicząca Rady

Mgr inż. PAWEŁ OKROJ (ORCID: 0009-0009-9607-2458)

Wibro-Projekt Tychy

Prof. dr hab. inż. JACEK HULIMKA (ORCID: 0000-0002-7798-4277)

Politechnika Śląska

Wydział Budownictwa

Analiza numeryczna zachowania się gazociągu podziemnego w warunkach zadanych wymuszeń dynamicznych

Numerical analysis of behaviour of underground gas pipeline under specified dynamic inputs

STRESZCZENIE: W artykule omówiono metodę oceny wpływów dynamicznych obciążających podziemny gazociąg w całości osadzony w podłożu gruntowym, bazującą na numerycznej analizie obliczeniowej układu grunt + gazociąg i pomiarze drgań wierzchniej płaszczyzny gruntu ponad ocenianym przewodem. Przedstawione podejście, poparte przykładowymi wynikami, jest zgodne z aktualną normą i bezpieczne – nie wymaga bowiem wykonania odkrywek w celu osadzenia czujników pomiarowych bezpośrednio na konstrukcji gazociągu.

Słowa kluczowe: gazociąg, wpływy dynamiczne, drgania, bezpieczeństwo, analiza MES.

ABSTRACT: The paper discusses a method for evaluation of the dynamic loads acting on an underground gas pipeline fully embedded in the ground. The method is based on a numerical computational analysis of the soil with pipeline system and the measurement of vibrations of the top ground plane above the pipeline analysed. The approach, supported by exemplary results, complies with the current standard and is a safe alternative to direct vibration measurements which require excavating and placing measurement sensors directly on the pipeline structure.

Keywords: gas pipeline, dynamic inputs, vibration, safety, FEM analysis.

Pomiary drgań mechanicznych są jedną z metod diagnostycznych koniecznych w przypadku budynków lub budowli narażonych na wymuszenia skutkujące pojawieniem się odpowiedzi dynamicznej [1]. W znakomitej większości przypadków pomiarami takimi są objęte obiekty lub ich części bezpośrednio dostępne do montażu aparatury badawczej. W przypadku budowli w całości lub częściowo usytuowanych pod ziemią zwykle przynajmniej część konstrukcji jest bezpośrednio dostępna od zewnątrz (np. korona fundamentu) lub od wnętrza (np. zbiornik podziemny lub tunel). W takich przypadkach, gdy możliwe jest osadzenie na nich zestawu czujników pomiarowych i wykonanie odpowiednich odczytów, dalsze postępowanie (analiza wyników, ocena wrażliwości obiektu, oszacowanie szkodliwości drgań, ocena zagrożenia wystąpieniem rezonansu) jest stosunkowo proste. Sprowadza się ono do obróbki obliczeniowej danych uzyskanych w bezpośrednich pomiarach [2], przy wspomaganiu się skalami wpływów dynamicznych [3] lub wynikami prowadzonej we własnym zakresie analizy parasejsmicznej [4], zgodnie z wytycznymi normy [5].

Sporadycznie występują jednak obiekty, w przypadku których pojawia się pewna niemoc diagnostyczna polega-

jąca na braku możliwości wykonania bezpośrednich pomiarów. Jednym z takich przypadków są w całości podziemne obiekty liniowe – rurociągi, niedostępne bez choćby lokalnej ingerencji w otaczający je grunt, osadzone bądź bezpośrednio w podłożu gruntowym, bądź we wnętrzu konstrukcji ochronnych w gruncie. Dodatkowym utrudnieniem jest fakt funkcjonowania tych konstrukcji pod obciążeniami technologicznymi wynikającymi z ich eksploatacji w trybie ciągłym.

W wielu przypadkach konstrukcje rurociągów narażone są na oddziaływania dynamiczne, np. wynikające z konieczności wibracyjnego lub uderowego wprowadzania do podłoża pali lub grodzic w ich bezpośrednim sąsiedztwie. Pomiary drgań takich rurociągów, jeśli są uznane za konieczne, praktycznie zawsze są obecnie wykonywane w sposób bezpośredni (zdaniem autorów niebezpieczny), co wymusza wykonanie odkrywek w celu umożliwienia zabudowania czujników pomiarowych. Stan taki jest utrzymywany przez cały okres realizacji planowanych prac dynamicznych, po czym odkrywka jest likwidowana. Opisana metoda dostarcza dokładnych, bezpośrednich wyników – lecz z zastrzeżeniem, że są one uzyskane w sytuacji nietypowej dla normalnych warunków użytkowania obiektu, kiedy jest on w całości osadzony w podłożu gruntowym.

Tymczasem, jeśli przewód podziemny był osadzony w podłożu przez dłuższy czas, to grunt wokół niego osiadł i zagęścił się w stopniu pozwalającym na uznanie, że obydwie te elementy są ze sobą powiązane (przemieszczenia obydwu struktur są identyczne, odpowiadające swobodnym deformacjom gruntu). Zatem nawet przekopanie gruntu ponad przewodem, a tym bardziej wykonanie trwałej odkrywki w układzie wzajemnie współpracujących ze sobą struktur [6], przykładowo w celu założenia na przewodzie stanowiąca pomiarowego, powoduje:

- zaburzenie dotychczasowej bezpiecznej pracy przewodu podziemnego w zagęszczonym gruncie, na skutek zmiany warunków pracy fragmentu jego górnego płaszcza, przy niewiadomym stanie technicznym konstrukcji tego przewodu i jego pracy pod obciążeniem technologicznym;

- zróżnicowane zachowanie się odsłoniętego fragmentu przewodu podziemnego w obliczu sygnału dynamicznego od prowadzonych robót – docierającego do tego przewodu i pobudzającego go do drgań, mogące skutkować lokalnym rozszczelnieniem górnego fragmentu płaszcza w rejonie ingerencji w grunt;

- lokalną zmianę charakteru współpracy dotychczasowego układu zagęszczony grunt – przewód podziemny, w efekcie czego mierzone właśnie tam drgania nie będą oddawać faktycznej pracy tego przewodu całkowicie osadzonego w gruncie, obrazując jedynie lokalne jego drgania w rejonie ingerencji w grunt;

- powstanie odmienności faktycznego osadzenia / podparcia przewodu, w porównaniu z przyjętym jego modelem (sztywny kontakt z gruntem), powodującej potrzebę uwzględnienia korekty spowodowanej lokalnym rozluźnieniem gruntu (przekopaniem go) lub nawet jego brakiem (odkrywką).

Dodatkowo, jeśli rozważany przewód podziemny nie jest osadzony w gruncie bezpośrednio, lecz pośrednio, poprzez dodatkową strukturę (stalową rurę ochronną, żelbetonowe korytka itp.), to wykonana odkrywka w gruncie i tak nie pozwala na bezpośrednie dotarcie ze stanowiskiem pomiarowym do analizowanego przewodu, a zatem bezpośredni pomiar oddziaływania na konstrukcję pomimo wykonania odkrywki i tak nie jest możliwy.

W ostatnich latach pojawiła się potrzeba znaczącej rozbudowy infrastruktury do przesyłu gazu, bo zdolność przesyłowa istniejących podziemnych gazociągów okazała się niewystarczająca. W wielu przypadkach postanowiono więc wbudować nowe gazociągi, o istotnie większych przekrojach, w bezpośrednim sąsiedztwie istniejących, „równoległe” do nich. Nowoczesne metody ich osadzania bazują w większości na technologii bezwykopowej [7], z niewielkim udziałem wibracji lub uderu, jakkolwiek zwykle nie jest możliwe całkowite uniknięcie lokalnych robót wibracyjnych. W przypadku technologii wykopowych, zwykle na długich odcinkach w terenach nieurbanizowanych, często konieczne jest zabezpieczanie krawędzi wykopów, w tym grodzicami. Mnogość potrzeb wykonania obok istniejących gazociągów prac o charakterze wymuszeń dynamicznych spowodowała konieczność uzyskania pełniejszych niż dotąd informacji dotyczących

wpływu prowadzonych robót na podziemne elementy funkcjonujące pod obciążeniem. Należy przy tym mieć świadomość, że istniejące gazociągi były instalowane nierzadko kilkadziesiąt lat wcześniej, gdy nie stosowano ochrony katodowej, zatem ich stan korozyjny może być różny. Tym samym, co najmniej w części przypadków należy spodziewać się mniejszej niż nominalna odporności skorodowanych rur stalowych na drgania, przy czym zakres uszkodzeń korozyjnych może być bardzo różny.

Opisane wyżej problemy stały się przesłanką do poszukiwania metody umożliwiającej szacowanie wymuszeń dynamicznych bezpiecznych dla podziemnych gazociągów, bez konieczności wykonywania odkrywek, bazując na pomiarze drgań realizowanym poza konstrukcją przewodów.

Opis proponowanej metody

Norma PN-EN 1594 [8] precyzuje zasadnicze założenia proponowanej metody, zgodne z uproszczonym modelem płaskim [9]. Metoda ta pozwala również na uwzględnienie modelu nierównomiernego wymuszenia kinetycznego [10]. Zgodnie z normą wykonano analizę numeryczną trójwymiarowego modelu metodą elementów skończonych (MES), o opisanych niżej atrybutach.

- Masyw gruntowy ma wymiary odpowiednie, by można było zaniedbać wpływ warunków brzegowych na wyniki. Obejmuje on zestaw warstw poziomych, którym są przypisane parametry geotechniczne [11] podłoża gruntowego w miejscu prowadzonych badań. Masyw ten jest podparty w sposób wykluczający przemieszczenia pionowe oraz poziome, uwzględniając pochłanianie sygnałów na granicy jego podparć. Zgodnie z [8] w prostych przypadkach można wykorzystać normowe korelacje parametrów gruntowych (tak zrobiono w przykładzie obliczeniowym), natomiast tam gdzie jest to konieczne, należy posłużyć się danymi z dodatkowych badań, stosując w modelowaniu parametry gruntu wynikające z dokumentacji geotechnicznej.

- W masywie, na całej jego długości, jest zabudowana sztywno stykająca się z nim, całkowicie podziemna konstrukcja osłonowa lub zasadnicza rurociągu (w zależności od rzeczywistego rozwiązania). Jeśli przewód ma konstrukcję osłonową, to w jej wnętrzu jest osadzona konstrukcja zasadnicza przewodu. Rzędna osadzenia przewodu w modelu odpowiada jego lokalizacji w podłożu. Zamodelowany przewód ma cechy geometryczne i materiałowe rzeczywistej konstrukcji.

W tym miejscu należy doprecyzować charakter kontaktu pomiędzy powierzchnią zewnętrzną przewodu a powierzchnią otaczającego go gruntu. Jeśli grunt otaczający przewód jest wystarczająco zagęszczony (co najmniej 5 lat istnienia masywu gruntowego wokół przewodu), to założenie sztywnego kontaktu przewodu z gruntem jest prawidłowe. Wynika to z zapisu w normie [8]: *Ułożone w gruncie proste rurociągi mogą być rozpatrywane jako sztywno związane z otaczającym gruntem; nie ma tu żadnych przemieszczeń względnych między rurą i gruntem tak, że ich odkształcenia są takie same, tj. odpowiadają swobodnym deformacjom gruntu.* Sytuacja taka

uwarunkowana jest jednak utrwaloną stanem gruntu, a ten stabilizuje się wraz z upływem czasu. Przyjęcie wyżej okresu 5 lat jest założeniem bezpiecznym, wynikającym z praktyki. Jeśli jednak tak nie jest (przykładowo przewód znajduje się w podłożu krócej niż 5 lat, grunt ponad nim był przekopywany lub, w skrajnym przypadku, wykonana była trwała odkrywka w gruncie), to założenie sztywnego kontaktu pomiędzy tymi powierzchniami jest błędne i należy ten fakt odpowiednio uwzględnić w modelu.

Do przedstawionego powyżej opisowo modelu systemu grunt – przewód są przyłożone obciążenia dwojakiego rodzaju. Pierwszym jest obciążenie statyczne, obejmujące ciężar własny elementów modelu oraz zadeklarowane pozostałe obciążenia, w tym obciążenie naziemem, obciążenie założonym ciśnieniem medium we wnętrzu przewodu itp. Zakładając akceptowalny stan techniczny konstrukcji przewodu, analiza obliczeniowa oddziaływania tego obciążenia prowadzona będzie metodą liniową. Ponieważ model przewodu przyjęto jako trójwymiarowy, zatem jest rozważany jako powłoka i, w ramach analizy obliczeniowej, szacowane są w nim naprężenia zredukowane H-M-S (von Misesa) oznaczane jako σ_v . Drugim z oddziaływań są obciążenia dynamiczne, obejmujące możliwe modele zadanych wymuszeń (w niniejszym przypadku wibracyjne pogrążanie grodzic stalowych w podłożu gruntowym), w świetle oczekiwanych częstotliwości rezonansowych układu grunt – przewód, w minimalnym planowanym oddaleniu (w rzucie) od środkowego fragmentu przewodu. Zakładając akceptowalny stan techniczny konstrukcji przewodu, analiza obliczeniowa oddziaływania tego obciążenia prowadzona jest metodą liniową, typu TH (całkowanie równań ruchu) dla wytypowanych wyżej częstotliwości wymuszenia, wstępnie przy maksymalnej wartości siły wymuszającej przekazanej na strukturę gruntu przez podstawę i pobocznice grodzicy (z racji tymczasowego braku wyników pomiaru drgań). Podobnie jak wyżej, w analizie obliczeniowej szacowane są w konstrukcji rurociągu naprężenia zredukowane H-M-S (von Misesa), oznaczane jako σ_v . Dodatkowo oceniane są wartości amplitud drgań w uzgodnionych jednostkach, w funkcji ich widma.

Weryfikacja otrzymanych wyników numerycznych odbywa się kilkietapowo, według porządku jak niżej, dla wspomnianego przypadku wibracyjnego pogrążania grodzic w podłożu.

- Porównanie otrzymanych analitycznie amplitud drgań (przykładowo: prędkości) wybranych węzłów konstrukcji przewodu w sąsiedztwie zadanych wymuszeń dla kolejnych częstotliwości wymuszenia przy tej samej, wstępnie maksymalnej wartości siły wymuszającej przekazywanej na strukturę gruntu. Otrzymane wyniki umożliwiają ocenę zasadniczych atrybutów modalnych modelu, w szczególności ustalenie jego pasm rezonansowych. Znajomość tych pasm pozwala na wykluczenie ich (eliminację możliwości zaistnienia trwałego rezonansu) z grupy weryfikowanych pasm częstotliwości, określając akceptowalne częstotliwości zadanych wymuszeń.

Uwaga. Powyżej proponowany sposób jest tylko substytutem typowej analizy modalnej, ale bardzo skutecznym. Jednak poleca się go jedynie w przypadku analizy konstruk-

cji o bardzo dużej masie (masyw gruntowy) ze współpracującą z nim konstrukcją o znikomej masie (przykładowo – gazociąg stalowy). W takim przypadku, w typowej analizie modalnej nie dostrzeżemy zależności umożliwiających ocenę zasadniczych atrybutów modalnych modelu.

- Ustalenie dopuszczalnej wartości naprężenia zredukowanego w konstrukcji przewodu.

Uwaga. Należy ustalić stan techniczny przewodu oraz wynikającą z niego ewentualną redukcję wartości dopuszczalnej naprężenia zredukowanego dla aktualnego stanu technicznego.

- Wyliczenie dopuszczalnej możliwej wartości naprężenia zredukowanego σ_v od rozważanych wpływów dynamicznych w konstrukcji przewodu, jako różnicy między naprężeniem dopuszczalnym i naprężeniem pochodzącym od wpływów statycznych.

- Ponowne wykonanie analiz obliczeniowych modelu, w poszukiwaniu takiej wartości siły dynamicznej przekazywanej na grunt, która nie spowoduje przekroczenia wyliczonej dopuszczalnej wartości naprężenia zredukowanego σ_v od rozważanych wpływów dynamicznych w konstrukcji przewodu, w każdym z przyjętych pasm pozarezonansowych sygnału, przy identycznej wartości siły dynamicznej.

- Na podstawie uzyskanych wyżej sił ustalenie odpowiadających im wartości przyspieszenia wierzchniej płaszczyzny gruntu, ponad przebiegiem przewodu, w centralnym jego fragmencie. Minimalna wartość przyspieszenia dla kompletu pasm pozarezonansowych będzie dla nich wartością miarodajną.

- Wyrażenie zgody na wykonanie prób robót wibracyjnych pod monitoringiem drgań na powierzchni terenu, w minimalnej, rozważanej w obliczeniach odległości od przewodu.

Poniżej przedstawiono wytyczne utrzymania stanu gruntu w rejonie prowadzenia prac wibracyjnych, stabilizacji stanowisk pomiarowych w tym rejonie oraz weryfikacji faktycznych parametrów sygnałów drganiowych, na potrzeby oceny efektu wibracyjnego wbijania grodzic Lar-sena w grunt.

- Zgodnie z założeniami, struktura gruntu wokół rozważanego gazociągu przed, a także w czasie robót powinna być nienaruszona w strefie około 25 m od aktualnego ich frontu (brak zgody na odkopywanie gazociągu czy przekopywanie gruntu ponad nim, bez korekty modelu obliczeniowego).

- Zgodnie z założeniami, stanowisko pomiarowe powinno być stabilizowane „sztywno” na wierzchniej płaszczyźnie gruntu (bez wykonywania odkrywki w gruncie) ponad przebiegiem rozważanego rurociągu, na wprost aktualnego frontu robót. Zakładając, że front robót przemieszcza się równolegle do przebiegu podziemnego gazociągu (lub oddalając się od niego „w rzucie”), wystarczające jest stabilizowanie pojedynczego stanowiska na wprost frontu robót i przemieszczanie go sukcesywnie wraz z nim, wzdłuż przebiegu podziemnego gazociągu.

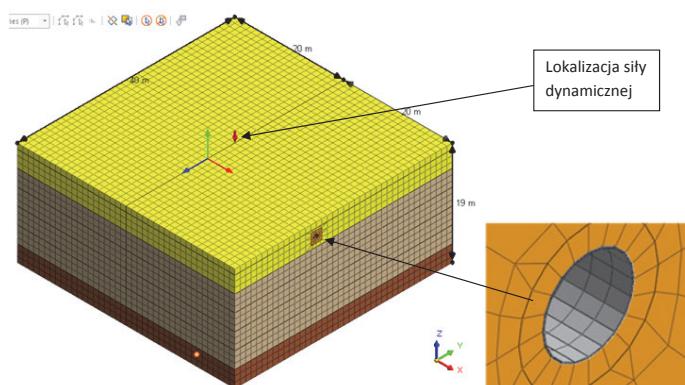
- Jeśli w charakterystyce mierzonego sygnału zaistnieją trwałe pasma częstotliwości odpowiadające pasmom oszacowanym jako rezonansowe, prowadzone prace

należy niezwłocznie przerwać i skorygować technologię robót.

- Otrzymana podczas pomiaru wartość przyspieszenia wierzchniej płaszczyzny gruntu w punkcie pomiarowym nie powinna przekroczyć wartości określonej wyżej, jako miarodajnej dla kompletu rozważanych pasm pozarezonansowych. Fakt nieprzekroczenia takiej wartości podczas prób robót pozwala na uznanie jej jako maksymalnej wartości przyspieszeń gruntu podczas kontynuacji prowadzenia robót dla ciągłego pasma wyznaczanego rozważanymi wyżej dyskretnymi pasmami pozarezonansowymi sygnału, gwarantującej bezpieczeństwo przewodu podziemnego.

Przykład praktyczny, z uproszczeniem procedury, stosownie do przyjętego wymuszenia

W celu praktycznego przedstawienia opisanej powyżej metody posłużono się przykładem wykonanym przy użyciu metody elementów skończonych (MES) w dedykowanym zagadnieniom geotechnicznym programie MIDAS GTS NX. Na rysunku 1 przedstawiono szkic modelu wraz z podstawowym opisem. W analizach przyjęto hybrydową opcję siatkowania (elementy czworokątne uzupełnione trójkątnymi), co zostało podyktowane koniecznością ograniczenia wielkości plików wynikowych.



Rys. 1. Szkic i opis modelu do przykładu praktycznego

W ramach przedsięwzięcia rozważono wibracyjne wbijanie grodzic Larsena, na głębokość 10 m, przy użyciu wibromłota ICE18. W minimalnej odległości w rzucie około 5 m od przebiegu frontu robót jest ułożony bezpośrednio w gruncie w całości podziemny gazociąg stalowy (DN700, $g = 11$ mm) do przesylu gazu pod ciśnieniem 8,4 MPa; wiek gazociągu to około 10 lat. Atrybuty gruntu przyjęto jako ujednolicone, przy braku wody gruntowej.

Dla zobrazowania powyżej opisanego przedsięwzięcia zamodelowano masyw gruntowy o wymiarach w rzucie 40×40 m i miąższości 19 m, podparty na wszystkich płaszczyznach bocznych oraz dolnej poziomej. W masywie tym wyróżniono warstwy poziome w celu umożliwienia wydzielenia struktur o odmiennych atrybutach, jednak na potrzeby niniejszego przykładu przypisano im identyczne atrybuty. W górnym fragmencie masywu osadzono gazociąg o podanych wcześniej parametrach. Bazując na wieku gazociągu (10 lat) oraz braku jego odkrywek, uznano, że jest on sztywno związany z gruntem. W ramach

obciążeń statycznych rozważono tylko ciężar własny struktur i obciążenie ciśnieniem medium we wnętrzu gazociągu. Obciążenie dynamiczne opisano w poprzednim akapicie – maksymalna siła dynamiczna generowana przez wibromłot wynosi 1100 kN.

Na potrzeby analizy MES przyjęto opisane niżej uproszczenia.

- Zwykle dla gruntu podatnego (np. nieskalistego) stosowany jest model Coulomba-Mohra. Jednak w rozpatrywanym przypadku, przy założeniu quasi-harmonicznego obciążenia dynamicznego (dla rozważania których stosujemy analizę liniową całkowania równań ruchu, czemu sprzyja liniowe zachowanie się gruntu) zastosowano model konstytutywny gruntu „Elastic”. Moduł sprężystości w przykładzie obliczeniowym to 50 MPa, a współczynnik Poissona – 0,23.

- Specyfikacja planowanej głębokości osadzenia grodzic wymusza liczbę niezbędnych kolejnych powtórzeń obliczeń, w funkcji podziału wysokościowego na elementy skończone, dla jednego położenia frontu robót w rzucie. W przypadku niniejszego modelu dokonano podziału co 1,0 m, zatem na potrzeby oszacowania procesu wbicia jednej grodzicy na planowaną rzędną końcową należy powtórzyć obliczenia dla 11 rzędnych pośrednich. Zwykle istotnie ogranicza się liczbę rzędnych, na jakich prowadzone są obliczenia; w niniejszym artykule obliczenia zostały przedstawione jedynie dla siły dynamicznej na rzędnej wierzchniej płaszczyzny terenu.

- Częstotliwość aplikacji siły dynamicznej generowanej przez wibromłot pracujący w trybie automatycznym, a także jej wartości, są modyfikowane atrybutami gruntu, w który wnika grodzica. Na potrzeby analizy dynamicznej wystarczające jest ograniczenie spektrum wymuszeń wibromłota do kilku skokowo różniących się pasm w świetle oczekiwanych częstotliwości rezonansowych gruntu, mianowicie: $f_d = 15\div 35$ Hz, co 5 Hz.

- Biorąc pod uwagę charakter wymuszenia, uznano, że wskazanym jego modelem będzie wykres sinusoidalny ze stałą liczbą obrotów nominalnych i stałą siłą dynamiczną, ze specyfikacją czasu trwania takiego stanu ustalonego, z nagłym zatrzymaniem obrotów (bez wybiegu). Po wykonaniu pomiarów drgań podczas próby robót dobrano w modelu obliczeniowym taką wartość siły dynamicznej efektywnie przekazywanej na strukturę gruntu, by uzyskać porównywalne przyspieszenia drgań wierzchniej płaszczyzny gruntu w modelu i in situ; w niniejszym przykładzie wartość tej siły przyjęto jako 550 kN.

- Ponieważ wiek gazociągu jest stosunkowo niewielki, można sądzić, że jeśli doszło do jego korozji, to ma ona charakter ujednolicony. Oznacza to, że do prowadzenia obliczeń można wykorzystać analizę liniową całkowania równań ruchu.

- Analizy całkowania równań ruchu będą prowadzone w widmach odpowiadających widmom obciążeń, dla zastosowanego tłumienia materiałowego oraz proporcjonalnego. Przyjęty model obciążenia w ramach analizy otrzymanego wibrogramu pozwoli na weryfikację faktycznego tłumienia w układzie.

Niżej, w formie skróconego raportu uzupełnionego charakterystycznym wibrogramem (rys. 2), przedstawiono

wyniki poszczególnych analiz obliczeniowych całkowania równań, uzupełnione komentarzem.

Dopuszczalna wartość naprężenia zredukowanego w konstrukcji rurociągu

Zakładając hipotetycznie, że stan konstrukcji rurociągu odpowiada jego stanowi nominalnemu oraz że rurociąg jest wykonany ze stali L360NE ($Re = R_{t0,5} = 360$ MPa), a także, że praca rurociągu będzie się odbywać w temperaturze nieprzekraczającej 60°C, dopuszczalne naprężenie zredukowane σ_v wyniesie: $1,0 \times R_{t0,5}(\Theta) = 360$ MPa.

Wyniki analizy statycznej

Naprężenia σ_v w gazociągu od:

- obciążeń stałych: 6,0 MPa,
- ciśnienia gazu: 256,0 MPa.

Wyniki analizy dynamicznej

Wartości dynamiczne zostały wyizolowane z całości obciążeń, zatem zostały podane bez wpływu grawitacji. Wartości przyspieszeń podano w węzłach naprzeciw miejsca przyłożenia wymuszenia na gruncie.

Wymuszenie [Hz]	15	20	25	30	35
Przyspieszenie – grunt [m/s ²]	6,0	21,0	17,5	12,5	11,0
Przyspieszenie – rurociąg [m/s ²]	5,5	18,0	15,0	9,5	8,0
Naprężenia zredukowane σ_v od wpływów dynamicznych [MPa]	7,0	15,5*	11,5*	7,5	6,0
Sumaryczne naprężenia zredukowane σ_v [MPa]	269,0	–*	–*	269,5	268,0

* Rezonans.

Na rysunku 2 przedstawiono przykładowy szkic przyspieszeń rezonansowych węzła wierzchniej płaszczyzny gruntu ponad przebiegiem gazociągu (kolor zielony) oraz węzła górnego płaszcza gazociągu (kolor czerwony), naprzeciw miejsca przyłożenia wymuszenia na gruncie. Widać tu odpowiedź rezonansową oraz spadek amplitud wskutek tłumienia, po zatrzymaniu wymuszenia.

Na podstawie przedstawionych wyżej wyników widać, że minimalna wartość przyspieszeń drgań [m/s²] wierzchniej płaszczyzny gruntu nad przebiegiem gazociągu w pozarezonansowych pasmach, w minimalnej odległości w rzucie od frontu prowadzonych robót, dla przyjętej siły dynamicznej efektywnie przekazywanej na strukturę gruntu, otrzymana na drodze analitycznej wynosi 6,0 m/s² (przy wymuszeniu 15 Hz). Biorąc pod uwagę fakt, że wartość częstotliwości roboczej wibromłota nie spadnie podczas robót poniżej częstotliwości rezonansowej, stwier-

dza się, że miarodajna (minimalna) wartość przyspieszenia wynosi 11,0 m/s², przy wymuszeniu 35 Hz.

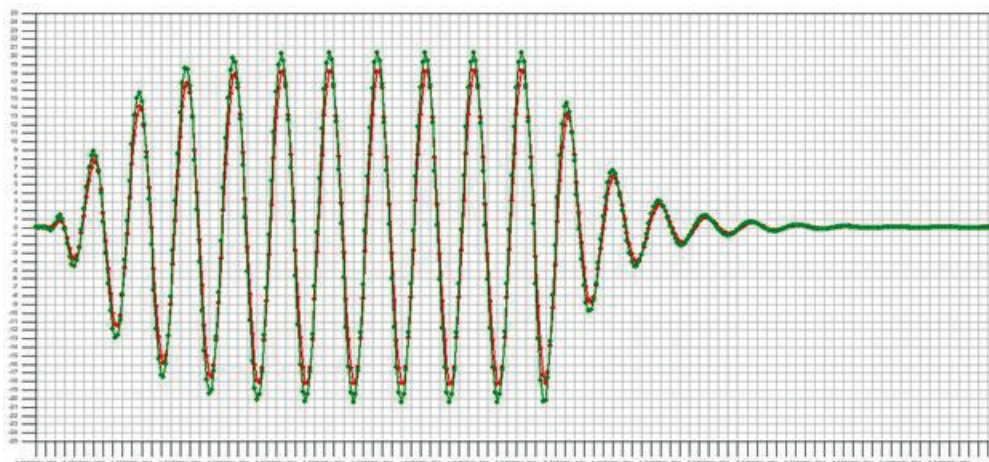
Ocena efektu wibracyjnego wbijania grodzic Larsena w grunt

Bazując na wynikach analizy MES, stwierdzono, że w paśmie widma 20÷25 Hz zachodzi rezonans częstotliwości wymuszającej co najmniej z jedną główną formą własną (tu: pionową) układu grunt – gazociąg. Oznacza to, że należy koniecznie unikać pracy ustalonej wibromłota w tym paśmie.

Ustalona analitycznie maksymalna wartość naprężenia zredukowanego σ_v sumarycznego od kompletu wpływów statycznych oraz dynamicznych w konstrukcji gazociągu w każdym uzgodnionym paśmie pozarezonansowym może osiągnąć co najwyżej 269,5 MPa (6,0 + 256,0 + 7,5). Zakładając, że aktualny stan techniczny gazociągu jest zbliżony do jego stanu nominalnego, wyliczona powyżej wartość powinna być porównana z wartością dopuszczalną naprężenia zredukowanego konstrukcji gazociągu (w funkcji gatunku materiału jego konstrukcji – tu: 360 MPa). Jeśli wartość σ_v otrzymana analitycznie (tu: 269,5 MPa) jest mniejsza od wartości dopuszczalnej naprężeń zredukowanych w konstrukcji (w funkcji gatunku materiału konstrukcji), można w wyznaczonej lokalizacji bezpiecznie kontynuować prace w pozarezonansowych pasmach mierzonego sygnału (wtedy maksymalna wartość przyspieszeń wierzchniej płaszczyzny gruntu w tych pasmach nie przekracza 11,0 m/s²). W przeciwnym razie należy prace przerwać i skorygować technologię ich prowadzenia.

Podsumowanie

W pracy poruszono zagadnienie szacowania wpływów dynamicznych obciążających gazociągi osadzone w podłożu gruntowym, w całości niedostępne. Podstawą rozważań była wieloletnia praktyka związana z szacowaniem wpływów dynamicznych obciążających różnorodnie istniejące obiekty oraz potrzeba wypełnienia luki w metodyce dotyczącej podziemnych instalacji przesyłowych. Zasadni-



Rys. 2. Przykład wykresu przyspieszeń rezonansowych dla wymuszenia 20 Hz (oś odciętych obrazuje czas analizowanego odcinka wymuszenia, tu: 1 s; oś rzędnych obrazuje przyspieszenia wytypowanych węzłów konstrukcji o ekstremalnie osiągniętych wartościach ok. 21 m/s²) – opis w tekście

czym problemem w przedstawionym zagadnieniu jest brak bezpośredniego dostępu do ocenianych obiektów, a zatem konieczność wykonywania odkrywek w gruncie w celu stabilizacji stanowisk pomiarowych bezpośrednio na ocenianej konstrukcji. Rozumiejąc zagrożenia związane z wykonywaniem odkrywek nad czynnymi gazociągami, a także nieuniknione rozbieżności pomiędzy wynikami w odkrywkach a rzeczywistym zachowaniem się rurociągów w gruncie, zaproponowano autorską metodę szacowania wpływów dynamicznych w podziemnych obiektach, korzystając z poniższych założeń.

Układ grunt – gazociąg jest przedstawiony jako numeryczny model 3D w przeznaczonym dla zaawansowanych zagadnień geotechnicznych programie MIDAS GTS NX, umożliwiając wykonanie kompletu niezbędnych analiz obliczeniowych.

Bezinwazyjny w stosunku do podłoża gruntowego pomiar drgań jest realizowany na jego wierzchniej płaszczyźnie, ponad przebiegiem rozważanego gazociągu, podczas realizacji wymuszeń dynamicznych. Pomiar ten ma za zadanie potwierdzenie ustalonego widma częstotliwościowego generowanego sygnału, oszacowanie wytypowanej wartości przyspieszeń drgań wierzchniej płaszczyzny gruntu nad przebiegiem gazociągu oraz, w świetle wyników analiz numerycznych, umożliwienie identyfikacji poziomu faktycznej siły dynamicznej przekazywanej na strukturę gruntu podczas robót.

W efekcie powyższego możliwe jest uniknięcie wystąpienia zjawisk rezonansowych oraz wiarygodne oszaco-

wanie sumarycznych naprężeń zredukowanych w konstrukcji rurociągu, pozwalające na ocenę jej bezpieczeństwa podczas realizacji prac o charakterze dynamicznym.

PIŚMIENNICTWO

- [1] Ciesielski R. i inni: Ocena wpływu wibracji na budowle i ludzi w budynkach (diagnostyka dynamiczna). ITB, Warszawa 1993.
- [2] Rybak J.: Sterowanie robotami geotechnicznymi w oparciu o pomiary drgań w otoczeniu budowy. *Geoinżynieria: drogi, mosty, tunele*, 2014, nr 4, s. 34-39.
- [3] PN-B-02170:2016. Ocena szkodliwości drgań przekazywanych przez podłoże na budynki.
- [4] Gromysz K.: *Dynamika budowli. Obliczenia układów prętowych i o masach skupionych*. PWN, Warszawa 2022.
- [5] EN 1998-1:2004 Eurokod 8. Design of structures for earthquake resistance. Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings.
- [6] Kliszczewicz B.: Interakcja podziemnych rurociągów o różnych sztywnościach z gruntem. *WPŚ, Gliwice* 2014.
- [7] Wysokowski A.: Przegląd technologii bezwykopowych stosowanych w budownictwie komunikacyjnym. *Materiały Budowlane*, 2015, nr 4, s. 56-58, DOI 10.15199/33.2015.04.16.
- [8] PN-EN 1594:2014-02. Systemy dostawy gazu. Rurociągi o maksymalnym ciśnieniu roboczym powyżej 16 bar. Wymagania funkcjonalne.
- [9] Kawecki J.: Diagnostyka dynamiczna konstrukcji zagłębionych w gruncie. *XX Konferencja Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji, Wisła-Ustroń*, 2001, Tom 1, s. 261-272.
- [10] Dulińska J., Zięba A.: Wpływ wstrząsów górniczych i odstrzałów w kamieniołomach na odpowiedź dynamiczną gazociągu. *Czasopismo Techniczne. Budownictwo*, 2007, nr 2-B, s. 19-27.
- [11] Wilun Z.: *Zarys geotechniki*. WKŁ, Warszawa 1987.