

Pomiary drgań rurociągów ciepłowniczych

Vibration Measurements of District Heating Pipelines

DOI: 10.15199/9.2018.9.3

TOMASZ GAWROŃSKI
 WIESŁAW MALISZEWSKI
 TOMASZ ŻARNOWSKI
 EWA KRĘCIELEWSKA

Słowa kluczowe: awarie rurociągów ciepłowniczych, drgania rurociągów, nieszczelności rurociągów ciepłowniczych, metody wykrywania awarii

Streszczenie

Pomiary drgań rurociągów ciepłowniczych wykonane w końcu 2016 roku przez Energomontaż na zlecenie Veolia Energia Warszawa wykazały, że awaria rurociągu może generować indywidualną częstotliwość w sygnale analizowanych wibracji. W 2017 i 2018 roku wykonano pomiary w 64 punktach zlokalizowanych w 64 komorach ciepłowniczych, część z nich znajdujących się w pobliżu stwierdzonych awarii. W artykule przedstawiono wstępne wyniki badań, które zdają się potwierdzać przydatność pomiarów drgań w wykrywaniu nieszczelności sieci ciepłowniczej.

Keywords: district heating failures, pipeline vibrations, pipeline leaks, leakage detection methods

Abstract

The measurements of vibrations of heating pipelines made at the request of Veolia Energia Warszawa at the end of 2016 by Energomontaż showed that the pipeline failure may generate an individual frequency in the signal of the analyzed vibrations.

In 2017 and 2018 measurements were carried out at 64 points located in 64 heating chambers, some of them in the vicinity of identified failures.

The article presents preliminary results of tests that seem to confirm the usefulness of vibration measurements in detecting leakages in a heating network.

© 2006-2018 Wydawnictwo SIGMA-NOT Sp. z o.o.
 All right reserved

1. Wstęp

Warszawski system ciepłowniczy (w.s.c.) jest największym systemem scentralizowanym w kraju i jednym z największych w Europie. Warszawska sieć ciepłownicza ma długość ok. 1800 km, z czego ok. 98% rurociągów zlokalizowana jest pod ziemią. Większość awarii w.s.c. (ponad 95%) odnotowuje się na odcinkach sieci kanałowej, gdzie odnalezienie miejsc wystąpienia awarii jest utrudnione, z powodu usytuowania rurociągów.

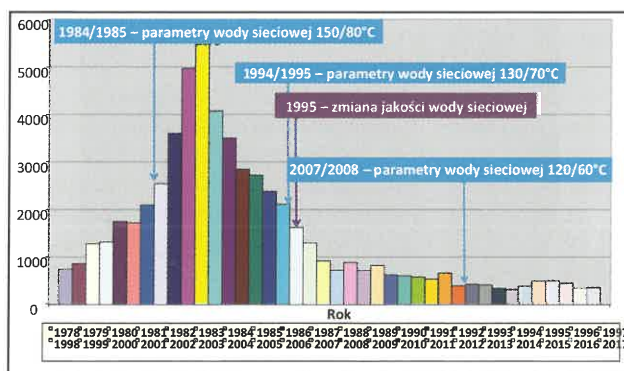
Rurociągi kanałowe eksploatowane są w w.s.c. od kilkadziesiąt lat. W tym okresie rurociągi były eksploatowane przy różnych parametrach i jakości wody sieciowej. Na niektórych odcinkach były one i są nadal narażone na kontakt z wodami zewnętrznymi zalewającymi kanały czy oddziaływanie prądów błędzących. Niekorzystne warunki są przyczyną korozji rurociągów (zarówno zewnętrznej – powierzchniowej, jak i wewnętrznej – wżerowej), któ-

ra jest główną przyczyną (około 80%) awarii rurociągów kanałowych.

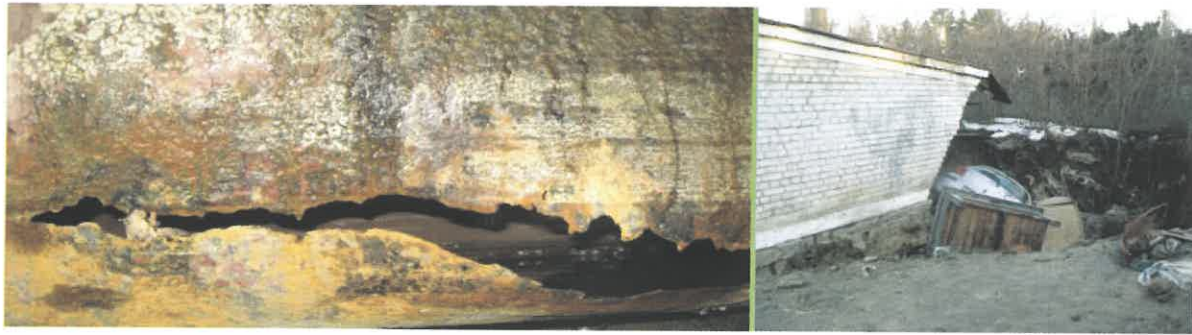
Na rysunku 1 przedstawiono liczbę awarii w w.s.c w zależności od zmian parametrów i warunków pracy sieci.

Wystąpienie awarii, związanej ze wstrzymaniem lub ograniczeniem dostawy ciepła, skutkuje ponoszeniem przez przedsiębiorstwo ciepłownicze kosztów związanych, m.in. z usuwaniem awarii, niedostarczaniem ciepła, naprawami bądź przebudową, utraconą wodą sieciową – tym wyższych, im większy jest zasięg awarii.

mgr inż. **Tomasz Gawroński**, Przedsiębiorstwo Usług Naukowo-Technicznych Pro Novum
 mgr inż. **Wiesław Maliszewski**, niezależny ekspert
 mgr inż. **Tomasz Żarnowski**, osoba do kontaktu:
 tomasz.zarnowski@veolia.com
 Instytut Techniki Ciepłej, Politechnika Warszawska, Veolia Energia Warszawa S.A.
 mgr inż. **Ewa Kręcielewska**, Veolia Energia Warszawa S.A.



Rys. 1. Liczba awarii w.s.c w latach 1978–2017
 Fig. 1. Number of Warsaw district heating system failures during 1978–2017



Rys. 2 Awaria rury przewodowej DN600 i zawalenie się garażu postawionego (nielegalnie) nad kanałem ciepłowniczym
 Fig. 2 Failure of a DN600 pipeline, collapse of a garage built (illegally) over a DH duct



Rys. 3. Awaria rury przewodowej DN1000, zamknięcie na kilka miesięcy jednego ze strategicznych skrzyżowań w mieście
 Fig. 3. Failure of a DN1000 pipeline, a strategic crossroads was closed for a few months

Następstwa wystąpienia awarii sieci ciepłowniczej (przykładowe – przedstawione na rysunkach 2-4) powodują konieczność podejmowania działań mających na celu stworzenie narzędzi umożliwiających wczesne wykrywanie awarii. W przypadku małego wycieku, który nie powoduje widocznych objawów, takich jak zalanie ulicy czy wypływ pary wodnej z komór, wykrycie nieszczelności jest bardzo trudne. Firma Veolia Energia Warszawa, właściciel w.s.c., prowadzi wiele działań zmierzających do poprawy niezawodności i bezpieczeństwa dostaw ciepła do odbiorców. Jednym z tych działań jest poszukiwanie metod detekcji ubytków wody sieciowej.

W artykule przedstawiono wyniki dotychczasowych badań nowej metody wykorzystującej pomiary i analizę widmową drgań.



Rys. 4. Awaria rury przewodowej DN500, zniszczenie samochodów zaparkowanych w pobliżu miejsca awarii
 Fig. 4 Failure of a DN 500 pipeline, destruction of cars parked near the failure

2. Cel badań

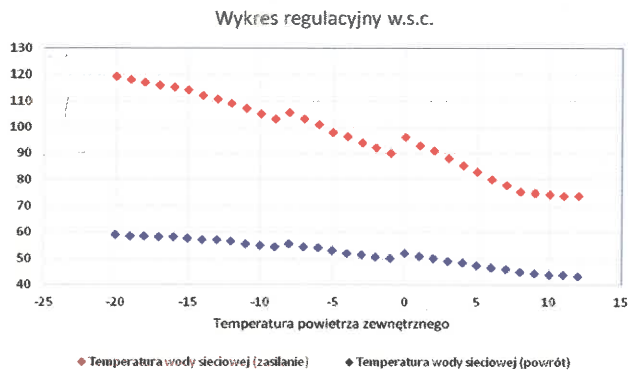
Celem badań jest sprawdzenie czy na podstawie pomiarów i analiz widmowych drgań możliwe jest określenie przybliżonej lokalizacji wystąpienia nieszczelności (awarii) rurociągów kanałowej sieci ciepłowniczej.

3. Pomiary i diagnostyka stanu technicznego urządzeń na podstawie analizy sygnałów drgań – informacje ogólne

Metoda oceny stanu technicznego urządzeń na podstawie pomiarów i analiz poziomu drgań znana jest w technice od połowy lat siedemdziesiątych XX wieku. Ta technologia diagnostyki doczekała się opracowania gruntownych podstaw teoretycznych [1] i [2].

W kolejnych latach metody pomiarowe zostały znormalizowane w wyniku opracowania i wprowadzenia do powszechnego stosowania norm międzynarodowych ISO z serii 20816 [3]. W normach podano precyzyjne wymagania co do poziomu dopuszczalnych drgań w typowych urządzeniach stosowanych w energetyce i w przemyśle.

Szybki rozwój technologii i informatyki, widoczny w ostatnich 20 latach, miał wpływ na rozwój tej metody pomiarowej. Obecnie na rynku dostępne są systemy pomiarowe oferowane przez różne firmy umożliwiające wdrożenie systemu diagnostyki eksploatacyjnej, której podstawą jest kompleksowa analiza wyników badań kontrolnych. Zasadniczą część systemu stanowią mierniki drgań (nazywane obecnie „skomputeryzowani zbieraczami danych”) oraz oprogramowanie komputerowe służące do analizy i przechowywania danych pomiarowych. Nowoczesne bazy da-



Rys. 5. Wykres regulacyjny w.s.c.
Fig. 5. Regulation chart for warsaw district heating system

nych diagnostycznych mogą także pracować w sieciach lokalnych (LAN) lub rozległych (WAN). Ta technologia pomiarowa okazała się skuteczna w wielu zastosowaniach praktycznych w energetyce i przemyśle [4].

4. Wykonane badania

W ramach zaplanowanego cyklu badawczego obiektem pomiarów były wybrane 64 komory sieci ciepłowniczej w Warszawie [6], [7], [8] i [9].

W pierwszym etapie prac wybrano 24 punkty pomiarowe zlokalizowane w 24 komorach. Ze względu na zmiany temperatury wody sieciowej (rys. 5 – wykres regulacyjny w.s.c.) oraz różnice ciśnienia w ciągu roku (do 1,35 MPa w sezonie zimowym i 0,8 MPa w sezonie letnim) zaplanowano wykonanie pomiarów w trzech różnych okresach eksploatacji sieci ciepłowniczej – jesiennym, zimowym i letnim.

W drugim etapie prac skoncentrowano się na wykrytych awariach.

Od listopada 2017 roku wykonano pomiary drgań w komorach zlokalizowanych w pobliżu ośmiu awarii sieci ciepłowniczej. Pomiary i analizy widmowe drgań wykonywano nie tylko w miejscu awarii, lecz także w dalszej odległości od miejsca awarii aż do punktu, w którym sygnały drganiowe zanikały. Ze względu na fakt, że często między miejscem pomiaru a miejscem awarii zamontowane są różne urządzenia (kompensatory, armatura) czy kształtki (zwężki, trójniki, kolana) należało sprawdzić czy mają one wpływ na wynik pomiaru.

Celem obu etapów prac było uzyskanie odpowiedzi na pytania:

- czy zmiany ciśnienia i temperatury wody sieciowej mają wpływ na mierzone wartości drgań oraz identyfikacja „typowych”, powtarzalnych częstotliwości drgań i odróżnienie ich od „nietypowych”, szczególnych powstających w czasie awarii rurociągu,
- czy wycieki wody sieciowej z niesprawnej punktowo instalacji generują takie właśnie „nietypowe” szczególne częstotliwości drgań.

Podstawowymi wielkościami opisującymi amplitudę drgań mechanicznych, są:

- przemieszczenie (wychylenie),
- prędkość,
- przyspieszenie.

Do oceny wpływu drgań mechanicznych na stan sieci ciepłowniczej wykorzystano przyspieszenie drgań. Amplitudy sumarycznych drgań szerokopasmowych mierzono w zakresie do 20 000 Hz. W celu wyodrębnienia z odbieranego sygnału poszczególnych częstotliwości drgań sygnały pod-

dano analizom widmowym z wykorzystaniem techniki FFT (ang. *Fast Fourier Transform*). W każdym punkcie pomiarowym zebrano widma drgań w pasmach kolejno do 5 000 Hz, do 10 000 Hz oraz do 20 000 Hz. W każdym przypadku wykonano w technice cyfrowej FFT widma drgań z rozdzielczością 12 800 linii. Pozwoliło to na uzyskanie przebiegów widm drgań z dokładnością 0,39 Hz.

5. Analiza wyników pomiarów drgań rurociągów sieci ciepłowniczej

W pierwszym etapie badań wykonano pomiary w trzech okresach pracy sieci ciepłowniczej w 24 punktach pomiarowych zlokalizowanych w 24 komorach. Zebrano bogaty materiał pomiarowy obejmujący nie tylko wartości liczbowe drgań w poszczególnych punktach pomiarowych, lecz także wykonane z dużą rozdzielczością widma drgań w trzech kolejnych pasmach do 5 000 Hz, do 10 000 Hz oraz do 20 000 Hz.

Jak wykazały pomiary w wielu punktach pomiarowych amplitudy drgań na rurociągach sieci ciepłowniczej nie są wysokie – ok. 0,002 m/s², ale jak wykazuje bibliografia [5] nie należało się spodziewać wyższych.

Źródłami drgań, na które narażone są rurociągi ciepłownicze są:

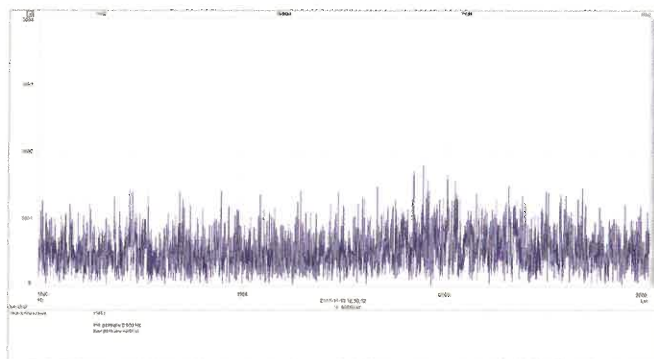
- ruch uliczny,
- zjawiska związane z przepływem wody sieciowej.

Ruch pojazdów mechanicznych generuje wymuszenia do drgań przenoszące się przez grunt w paśmie częstotliwości do ok. 100 Hz i podobnych amplitudach drgań. Drgania te oczywiście przenoszą się również na rurociągi ciepłownicze. Większość wytypowanych komór do pomiarów drgań zlokalizowana była w miejscach, gdzie ruch uliczny nie jest duży i nie miał on większego wpływu na rejestrowane przebiegi sygnałów drgań. Jednak w kilku miejscach zlokalizowanych blisko ruchliwych ulic, torów tramwajowych czy stacji metra napotkano na wyższe amplitudy drgań.

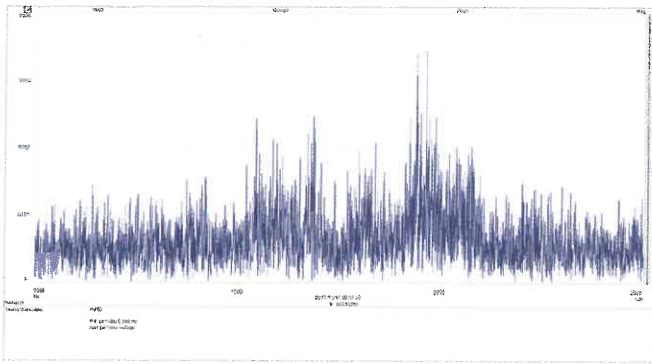
W otrzymanych analizach widmowych drgań mierzonych na rurociągach sieci ciepłowniczej można było wyszczególnić, typowe – występujące w większości analiz zakresy częstotliwości drgań:

- pasmo niskich częstotliwości z zakresu do 100 Hz – wymuszenia od ruchu ulicznego – z różnym nasileniem i chwilowymi wartościami zależnymi od chwilowego natężenia ruchu ulicznego,
- drgania o częstotliwości ok. 8 850 Hz,
- drgania o częstotliwości ok. 17 500 Hz.

Na rysunku 6 pokazano typowy przebieg widma drgań. W jednym z punktów pomiarowych wykryto wyraźnie



Rys. 6. Typowe widmo drgań mierzone w paśmie częstotliwości szerokości 1500 Hz
Fig. 6. Bandwidth 1,500 Hz typical vibration spectrum



Rys. 7. Widmo drgań w paśmie częstotliwości szerokości 1500 Hz. Pomiary w miejscu awarii
Fig. 7. Bandwidth 1,500 Hz vibration spectrum. Measurement in place of leakage

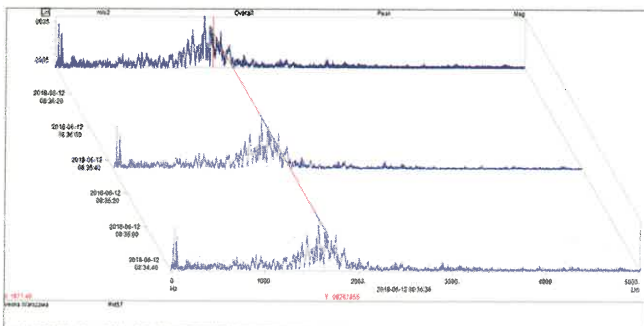
inny przebieg widma drgań. Rysunek 7, skalowany identycznie, ma wyraźnie wyższe składowe drgań w dość szerokim zakresie częstotliwości.

W pobliżu miejsca tego pomiaru stwierdzono niewielki wyciek wody sieciowej z rurociągu. Ta awaria, podobnie jak stwierdzona w 2016 roku w trakcie pierwszych pomiarów, była przesłanką do tego, aby w drugim planowanym etapie badań skupić się na analizach wartości drgań w miejscach awarii sieci.

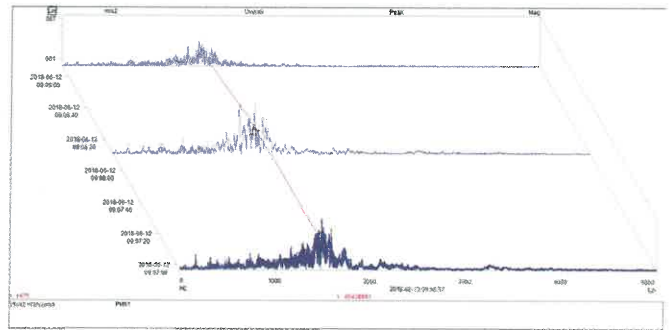
6. Analizy wyników pomiarów drgań w miejscach awarii sieci ciepłowniczej

Od listopada 2017 roku wykonano pomiary drgań w komorach zlokalizowanych w pobliżu ośmiu awarii sieci ciepłowniczej. W każdym przypadku sygnały drgań poddano analizom widmowym z wykorzystaniem techniki FFT. W widmach drgań wyróżniono kilka pasm, niektóre z nich były powtarzalne i występujące prawie we wszystkich pomiarach. Po analizach widm mierzonych w miejscach awarii zauważono jednak, że nieszczelności instalacji pobudzają drgania w paśmie o szerokości 1500 Hz, jak to pokazano na rys. 7.

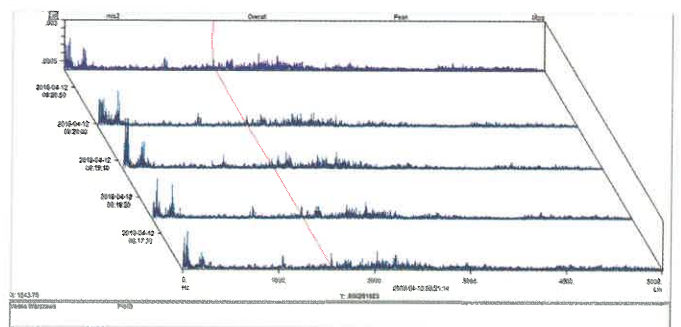
Poniżej opisano trzy stwierdzone awarie i podano wartości liczbowe drgań z tego pasma. Dołączono także wydruki analiz widmowych drgań wybranych punktów pomiarowych – rys. od 8 do 11.



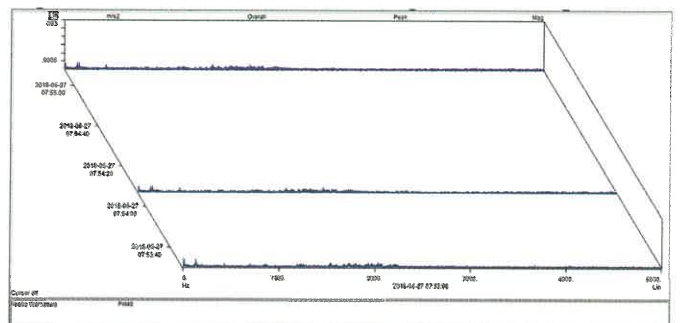
Rys. 8. Pkt. 57 – komora 1.1. Widma drgań mierzone na rurociągu w paśmie do 5 000 Hz.
Fig. 8. Point 57 – chamber 1.1. Vibration spectrum of pipeline in band up to 5,000 Hz



Rys. 9. Pkt. 61 – komora 2.1. Widma drgań mierzone na rurociągu w paśmie do 5 000 Hz
Fig. 9. Point 61 – chamber 2.1. Vibration spectrum of pipeline in band up to 5,000 Hz



Rys. 10. Pkt. 40 – komora 3.1 awaria. Widma drgań mierzone na rurociągu w paśmie do 5 000 Hz.
Fig. 10. Point 40 – chamber 3.1 leakage. Vibration spectrum of pipeline in band up to 5,000 Hz



Rys. 11. Pkt. 40 – komora 3.1 po usunięciu awarii. Widma drgań mierzone na rurociągu w paśmie do 5 000 Hz
Fig. 11. Point 40 – chamber 3.1 after leak repair. Vibration spectrum measurement of pipeline in band up to 5,000 Hz

6.1. Awaria nr 1 – pomiary dnia 12.06.2018 r.

Miejsca pomiaru i analiz drgań rurociągów obejmowały kolejne punkty pomiarowe położone w pobliżu komory 1.1 i 1.2, gdzie podejrzewano wystąpienie awarii:

Pkt. 56 – kanał między komorami 1.1 i 1.2, blisko awarii. Duże nasilenie ruchu ulicznego.

Pkt. 57 – komora 1.1, ok. 30 m od awarii

Pkt. 58 – komora 1.3, ok. 90 m od awarii

Pkt. 59 – komora 1.4, ok. 160 m od awarii

Pkt. 60 – komora 1.5, ok. 200 m od awarii

TABELA 1. Zestawienie amplitud drgań w paśmie o szerokości 1500 Hz – awaria nr 1 dnia 12.06.2018 r.

TABLE 1. List of vibration amplitudes in the band width of 1500 Hz – failure no. 1 from 12/06/2018

Punkt pomiarowy	m/s ²
Pkt. 56 – kanał między komorami 1.1 i 1.2	0,015
Pkt. 57 – komora 1.1	0,05
Pkt. 58 – komora 1.3,	0,036
Pkt. 59 – komora 1.4,	0,04
Pkt. 60 – komora 1.5	0,07

6.2. Awaria nr 2 – pomiary dnia 12.06.2018 r.

Miejsca pomiaru i analiz drgań rurociągów obejmowały kolejne punkty pomiarowe położone w pobliżu awarii:

- Pkt. 61 – komora 2.1, ok. 220 m od awarii
- Pkt. 62 – spust z rurociągu 2, ok. 120 m od awarii
- Pkt. 63 – właz kontrolny rurociągu 2, ok. 40 m od awarii
- Pkt. 64 – w miejscu awarii (komora 2.2), lekki wyciek na odpowietrzeniu

TABELA 2. Zestawienie amplitud drgań w paśmie szerokości 1500 Hz – awaria nr 2 dnia 12.06.2018 r.

TABLE 2. List of vibration amplitudes in the band width of 1500 Hz – failure no. 2 from 12/06/2018

Punkt pomiarowy	m/s ²
Pkt. 61 – komora 2.1	0,08
Pkt. 62 – spust z rurociągu 2	0,02
Pkt. 63 – właz kontrolny rurociągu 2	0,03
Pkt. 64 – w miejscu awarii (komora 2.2),	0,09

6.3. Awaria nr 3 – pomiary 27.06.2018 r.

Miejsca pomiaru i analiz drgań rurociągów obejmowały kolejne komory wybrane do pomiarów w pobliżu komory 3.1 – Pkt. 40, gdzie usunięto awarię wykrytą w czasie pomiarów dnia 12.04.2018 r.

- Pkt. 40 – komora 3.1
- Pkt. 42 – komora 3.2
- Pkt. 43 – komora 3.3
- Pkt. 44 – komora 3.4

TABELA 3. Zestawienie amplitud drgań w paśmie szerokości 1500 Hz – awaria nr 3 dnia 27.06.2018.

TABLE 3. List of vibration amplitudes in the band width of 1500 Hz – failure no. 3 from 27/06/2018

Punkt pomiarowy	m/s ²
Pkt. 40 – komora 3.1	0,005
Pkt. 42 – komora 3.2	0,10
Pkt. 43 – komora 3.3	0,06
Pkt. 44 – komora 3.4	0,0009
Pkt. 40 – komora 3.5	0,005

7. Wnioski i podsumowanie

- Wykonane pomiary wykazały, że awaria na jednym rurociągu generuje w sygnale analizowanych drgań szeregową częstotliwość drgań w paśmie o szerokości 1 500 Hz. Analizy wykonane w miejscach awarii zdają się wzajemnie potwierdzać.

- Zostały zidentyfikowane typowe częstotliwości drgań sieci ciepłowniczej. Parametry takie jak temperatura i ciśnienie wody sieciowej prawdopodobnie nie mają na nie wpływu.

- Wycieki wody z niesprawnej „punktowo” sieci ciepłowniczej generują „nietypowe”, szczególne częstotliwości drgań.

- Urządzenia (kompensatory, armatura) i kształtki (zwężki, trójniki, kolana) prawdopodobnie nie mają większego wpływu na częstotliwości drgań towarzyszących awariom sieci ciepłowniczej.

- Na podstawie dotychczasowych pomiarów wydaje się, że przedstawiona metoda analizy drgań może być skuteczna przy wykrywaniu nieszczelności w układach rurociągów sieci ciepłowniczej. Istnieje jednak potrzeba wykonania większej liczby pomiarów, w celu zidentyfikowania czynników mających wpływ na pomiar.

LITERATURA

- [1] Cempel Czesław, „Podstawy wibroakustycznej diagnostyki maszyn”, WNT, Warszawa 1982.
- [2] Morel J., Drgania maszyn i diagnostyka ich stanu technicznego, Wydanie polskie : Polskie Towarzystwo Diagnostyki Technicznej, 1994.
- [3] ISO 20816 *Mechanical vibration – Measurement and evaluation of machine vibration*.
- [4] Chyży Tadeusz. 2008. „Badania oddziaływań drgań pochodzenia komunikacyjnego na budynki mieszkalne i ludzi w aglomeracji Warszawskiej” *Kwartalnik Instytutu Techniki Budowlanej* – nr 1 (145).
- [5] Maliszewski Wiesław. 2012. „Z diagnostyką na co dzień”, czasopismo Służby Utrzymania Ruchu SUR – 6 (28).
- [6] Sprawozdanie Pro Novum nr 115.3574/2017, listopad 2017, Wykonanie pomiarów wibroakustycznych na rurociągach ciepłowniczych, (niepublikowane).
- [7] Sprawozdanie Pro Novum nr 011.3596/2018, luty 2018, Wykonanie pomiarów wibroakustycznych na rurociągach ciepłowniczych – etap 2, (niepublikowane).
- [8] Sprawozdanie Pro Novum nr 036.3614/2018, maj 2018, Wykonanie pomiarów wibroakustycznych na rurociągach ciepłowniczych – etap 3 Analizy awarii, (niepublikowane).
- [9] Sprawozdanie Pro Novum nr 041.3523/2018, lipiec 2018, Wykonanie pomiarów wibroakustycznych na rurociągach ciepłowniczych – etap 4 Analizy awarii – część 2, (niepublikowane).

www.sigma-not.pl

Największa baza artykułów technicznych
online!