

УДК 620.178.6

ВИКОРИСТАННЯ КОЛИВАНЬ СТРУНИ ДЛЯ ЗБУДЖЕННЯ ХВИЛЬ В МЕТАЛІ

Ю. Й. Стрілецький

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу.

Запропоновано використовувати поперечні коливання струни для збудження хвиль в металі. Струна натягнута між опорами, які закріплені на металевій основі при своєму поперечному коливанні збуджує коливання опор які в свою чергу збуджують коливання основи. Розглянуто спосіб забезпечення коливань струни із заданими параметрами. Проведено дослідження поширення коливань по основі із різними механічними властивостями.

Ключові слова: неруйнівний контроль, коливання струни, швидкість поширення хвилі, моди коливань

Предложено использовать поперечные колебания струны для возбуждения волн в металле. Струна натянута между опорами, которые закреплены на металлическом основании при своем поперечном колебании возбуждает колебания опор которые в свою очередь возбуждают колебания основания. Рассмотрен способ обеспечения колебаний струны с заданными параметрами. Проведено исследование распространения колебаний по основе с различными механическими свойствами. Ключевые слова: неразрушающий контроль, колебания струны, корость распространения волны, моды колебаний

A transverse vibrations of strings used to excite the waves in the metal. String stretched between supports, which are fixed on a metal base with transverse oscillation to his exciting oscillations of towers which in turn excite vibrations basis. The way to ensure vibrations of the strings specified parameters. A study of the spread of vibrations on the basis of different mechanical properties has been conducted

Keywords: non-destructive testing, fluctuations string, propagation velocity, fashion fluctuations

Вступ

Проблеми оцінки якості металу, методи і обсяг контролю стану устаткування є актуальним завданням дослідження надійності матеріалів технологічного призначення, в умовах експлуатації. Основна вимога до забезпечення працездатності всіх конструктивних частин технологічного обладнання є виявлення комплексних властивостей матеріалу в поєднанні з їх структурою на різних ієрархічних рівнях деформування, що забезпечують надійну і довговічну роботу в заданих умовах експлуатації. **наліз сучасного стану**

Зважаючи на високу небезпеку використання технологічного обладнання із структурними дефектами проводяться постійні дослідження для їх виявлення [1-4]. Важливими є роботи з розробки нових методів досліджень стану металу який перебуває в експлуатації тривалий термін [5,6].

Зміна структури металу впливає на його механічні властивості. Це призводить до зміни параметрів поширення механічних деформацій чи коливань. Часто зміни незначні, тому їх можна виявити тільки досліджуючи циклічні процеси внаслідок яких проходить накопичення

відхилень. Тому часто застосовуються різноманітні способи збудження коливань і дослідження їх поширення в металі. Коливання можуть охоплювати великі ділянки за рахунок різноманітних способів збудження. Доволі інформативними є хвилі Лемба[7] однак їх використання обмежується високою вартістю обладнання, що утворює постійним моніторинг.

Постановка задачі

Внаслідок конструктивних особливостей об'єктів досліджень, особливо в промислових умовах, датчики повинні бути встановлені на постійній основі і в недоступних для обслуговування місцях. Це ускладнює їх заміну чи повторне калібрування. Багато промислових об'єктів експлуатується багато років, тому датчики, які обслуговують їх мають працювати протягом всього терміну експлуатації. Також важливо, отримувати вимірювану інформацію у вигляді електричного сигналу[8].

Одними із таких датчиків які дають змогу вимірювати зусилля, прикладені до об'єкта дослідження є струнні датчики. Вони володіють довготривалою стабільністю [9]. Важливою перевагою таких датчиків є частотний вихідний сигнал, що дозволяє встановлювати їх

дистанційно і без втрат передавати інформаційний сигнал. В

Виклад основного матеріалу

Струна є пружним елементом, параметри поперечних коливань якої залежить від сили її натягу, модуля пружності матеріалу струни і маси коливальної частини струни. Задача поширення хвиль в гнучкій однорідній струні вирішувалася в XVIII столітті Данилом Бернуллі, Леонардом Ейлером, Жозефом Луї Лагранжа. Рівняння поширення поперечних хвиль в струні описується хвильовим рівнянням

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = b^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \quad (1)$$

де b — швидкість поширення хвилі, і його загальне рішення у виді двох біжучих хвиль $y = f_1(x - b \cdot t) + f_2(x + b \cdot t)$

Розгляд коливань і динамічних навантажень натягнутої гнучкої струни зводився до аналізу тільки поперечних коливань. Поздовжні коливання уздовж натягу, їх внесок в динаміку руху самої струни і приєднаної до струни опори, не враховувалися. Більш того, основний тон власних поздовжніх коливань лежить набагато вище основного тону поперечних коливань.

Бернуллі в 1755 р показав, що вільні поперечні коливання струни, збуджені довільним чином, можуть бути представлені у вигляді набору гармонійних коливань. Аналітичний такого представлення має наступний вигляд:

$$y(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cdot \cos[\omega_n \cdot t] + B_n \cdot \sin[\omega_n \cdot t]) * \sin\left(\frac{\pi n x}{l}\right) \quad (2)$$

де l - довжина струни, $\omega_n = \frac{\pi n b}{l}$ - частота коливань, x, y - поздовжня і поперечна координати, A_n, B_n - амплітуда коливань струни.

В основі найпростішої теорії збудження коливань струн щипкового музичного інструменту була задача, коли початкове відхилення струни формувалося у вигляді трикутника із певним відхиленням в точці впливу. В точках $x = 0$ і $x = l$ передбачалося жорстке закріплення струни в місцях закладення.

У процесі руху струна не тільки зміщується поперек свого початкового положення, а й відчуває додаткове розтягнення. В середині струни (рис. 1) поперек її первісного напрямку діє сила F_n . В той же час на опори між якими натягнута струна діє сила F_H

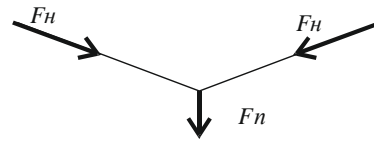


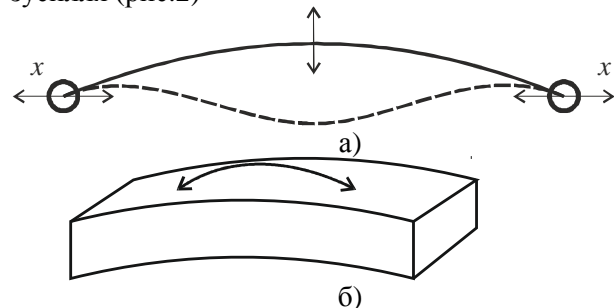
Рисунок 1 - Вплив поперечного переміщення струни на опори

Рівняння поперечно-поздовжніх коливань гнучкої попередньо натягнутою струни, отримані в роботі [10], окрім традиційного рівняння (1) виглядає наступним чином:

$$\frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = a^2 \frac{\partial}{\partial s} \left[\frac{\partial x}{\partial s} + \frac{l}{2(l+e_0)^2} \left(\frac{\partial y}{\partial s} \right)^2 \right] \quad (3)$$

Дане рівняння описує поздовжні коливання струни. Це рівняння неоднорідне, наявність в правій частині другого члена каже, що роль сили, що вимушує поздовжні коливань є поперечні складові. Значить, рішення (3) являє собою суперпозицію поздовжніх коливань на власних частотах і вимушених поздовжніх коливань на частотах поперечних, при цьому можливі резонансні явища, коли амплітуда поздовжніх коливань різко зростає.

Отже струна натягнута між опорами при коливанні збуджує коливання основи, на яких встановлено ці опори. В залежності від способу збудження амплітуди мод коливань струни будуть різні. Моді з різними номерами збуджують різні коливання основи. Непарні моді будуть викликати деформації в поздовжньому напрямку. Ці деформації прикладені до основи будуть викликати згинаючі зусилля (рис.2)



а- форма коливань струни, б- деформація основи

Рисунок 2- Збудження коливань основи непарними модами

Парні моді будуть викликати складні коливання пов'язані із знакозмінними зусиллями в поперечному напрямку. Такий вплив буде призводити до виникнення крутильних зусиль (рис.3).

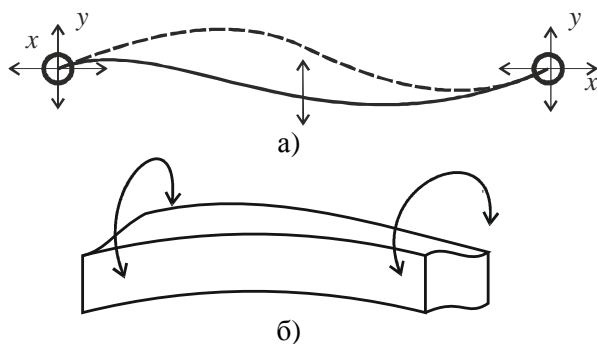
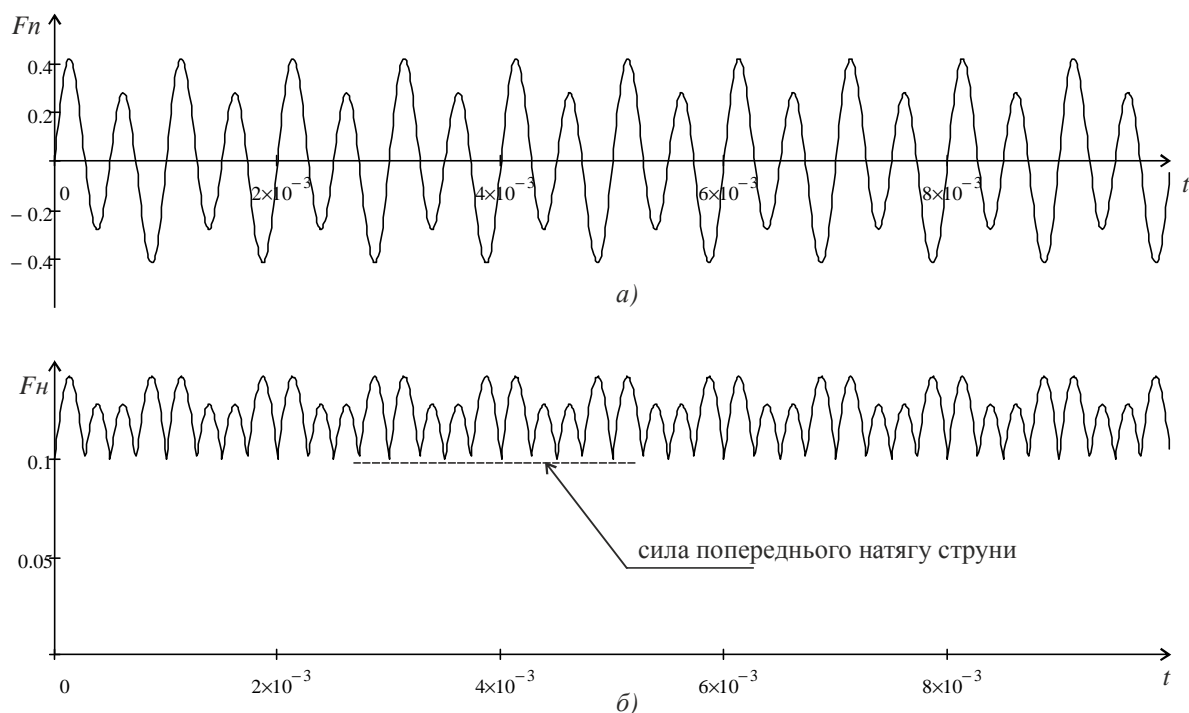


Рисунок 3 - Збудження коливань основи парними модами

При коливанні опор на поверхні основи збуджуються коливання в самій основі, які поширюються від однієї опори до іншої і навпаки. Дійшовши до сусідньої опори коливання через неї буде впливати на рух струни. При відхиленні струни від положення спокою на опори діє сила натягу, направлена на зближення опор. В положенні спокою сила натягу зменшується, але напрям її зберігається. Таким чином сила натягу, що діє на опори і відповідно на основу завжди одного знаку і пропорційна до модуля переміщення струни в поперечному напрямку (рис. 4)



а- сила, що діє на струну в поперечному напрямку, б- сила натягу, що діє на опори

Рисунок 4 - Вплив поперечної сили на силу натягу струни

Збудження опорами струни основи викликає коливання в основі, які залежать від властивостей самої основи. Поперечні коливання як відомо залежать від сили, прикладеної до основи і її маси при фіксованій довжині. Окрім сили також важлива швидкість поперечних хвиль. Поперечні хвилі залежать від модуля Юнга і коефіцієнта Пуасона. Таким чином коливання основи чутливе до впливу сили і стану металу.

Для збудження поперечних коливань струни використовуються різноманітні способи. Електрично струну можна збудити за допомогою

взаємодії магнітного чи електричного поля із металом струни. Може застосовувати магнітоелектричне і електромагнітне збудження. При магнітоелектричному збудженні струна через яку протікає струм взаємодіє із магнітним полем постійного магніту, встановленого поблизу струни. Під дією сили Ампера струна починає зміщуватися в напрямку перпендикулярному до вектора індукції магнітного поля. Рух струни в магнітному полі спричиняє появу різниці потенціалів на її кінцях пропорційну швидкості переміщення струни згідно правила Лоренца.

Якщо отриману таким чином різницю потенціалів використати для повторного формування струму збудження, то коливання в струні будуть вимушеними і незатухаючими. Різниця потенціалів отримана на струні буде пропорційна швидкості яка є похідною від переміщення струни в просторі. Амплітуда коливань генератора, коливальним елементом якого є натягнута струна стабілізується. Тому амплітуда переміщення струни в точці взаємодії магніта зі струною буде фіксованою.

Колівання струни описуються сукупністю стоячих хвиль (2). Амплітуди цих коливань залежать від способу збудження струни. При підтриманні вимушених коливань в точці струни очевидно що в цій точці всі складові хвиль в один час будуть мати одне значення. Тобто для n

$$\begin{aligned} y_1 &= A_1 \cdot \sin\left(\pi \cdot \frac{x}{l}\right) = \\ &= A_2 \cdot \sin\left(2\pi \cdot \frac{x}{l}\right) = \dots = \\ &= A_n \cdot \sin\left(n \cdot \pi \cdot \frac{x}{l}\right) \end{aligned} \quad (4)$$

звідки амплітуду кожної із мод можна визначити наступним

$$A_n = \frac{A_1 \cdot \sin\left(\pi \cdot \frac{x}{l}\right)}{\sin\left(n \cdot \pi \cdot \frac{x}{l}\right)} \quad (5)$$

В залежності від положення точки до якої прикладається магнітне поле із яким взаємодіє струна амплітуди мод струни будуть різним. Таким чином можна збуджувати струну на будь-які моді чи на їх комбінації. Приклад вибору точки збудження наведено на рис.5.

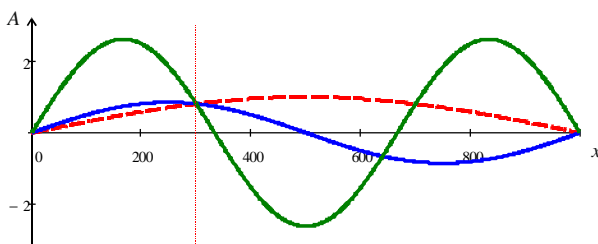


Рисунок 5- Вплив положення точки збудження струни на амплітуду різних мод коливань струни

Залежно від часу проходження хвилі від опори до опори змінюється спектр коливань струни. Схожі властивості має каскадний інтегрально-гребінчатий фільтр Хогенгауера. Це різновид фільтра із нескінченною імпульсною характеристикою, що задається рівнянням

$$y(n) = x(n) \pm f[y(n-m)], \quad (6)$$

де $x(n)$, $y(n)$ дискретизовані значення вхідного і вихідного потоку, $f(\cdot)$ -функціональна залежність, яка модифікує затримані значення, m - затримка. Структурна схема такого фільтра зображена на рис. 6.

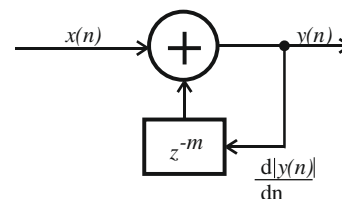


Рисунок 6 - Структурна схема прототипа інтегрального гребінчатого фільтра

АЧХ фільтру складним чином залежить від часу затримки та коефіцієнта зворотнього зв'язку. Приклади АЧХ для різних значень затримки наведено на рис.7.

Отже за допомогою аналізу спектральної щільності сигналу, отриманого від переміщення струни, натягнутої між опорами, встановленими на досліджуваній основі можна встановити зміну швидкості проходження коливань між цими опорами.

Для перевірки наведених тверджень були проведені лабораторні дослідження за допомогою розробленої лабораторної установки. Структурну схему лабораторної установки наведено на рис. 8. Струна 1, натягнута між опорами 2, які встановлені на досліджувану основу 3. Збудження забезпечується магнітним полем магніта 4, а незатухаючі коливання підтримуються генератором 5. Спектральна щільність сигналу визначається аналізатором спектру 6.

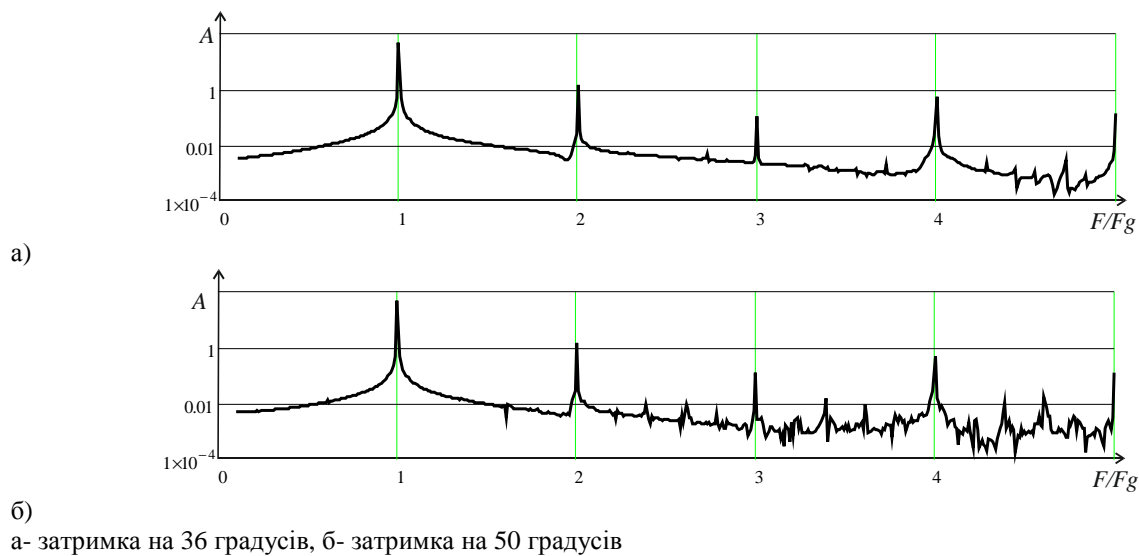


Рисунок 7 - Нормована АЧХ інтегрально-гребінчатого фільтра

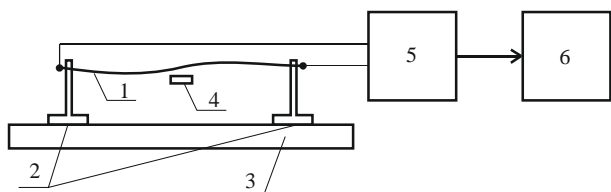


Рисунок 8- Схема лабораторної установки для дослідження спектральної щільності коливань струни

За допомогою даної лабораторної установки було знайдено спектральну щільність коливань струни закріпленої на

металевій основі стандартного взірця, виготовленого для досліджень на розтяг (рис.9), а також на взірці, який отримав пластичну деформацію (рис.10). Як видно на наведених нормованих по частоті спектральних щільностях коливань, окрім складових, що визначаються гармоніками коливань присутні проміжні складові між 2-гою і 3-тєю гармоніками. За аналогією із АЧХ інтегрально-гребінчатих фільтрів, поява множини проміжних складових спектру пояснюється збільшенням часу затримки сигналу, який проходить по основі.

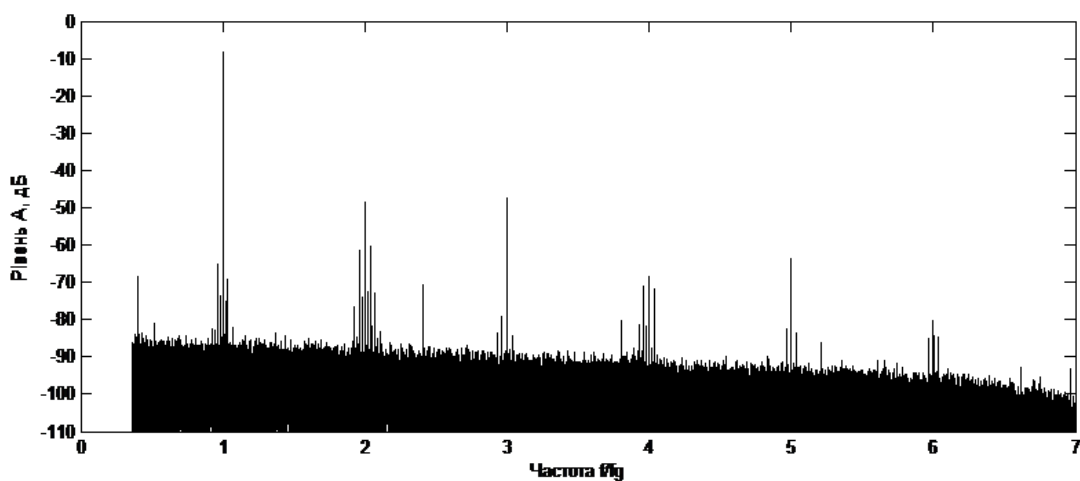


Рисунок 9 - Спектральна щільність коливань струни закріпленої на металевій основі

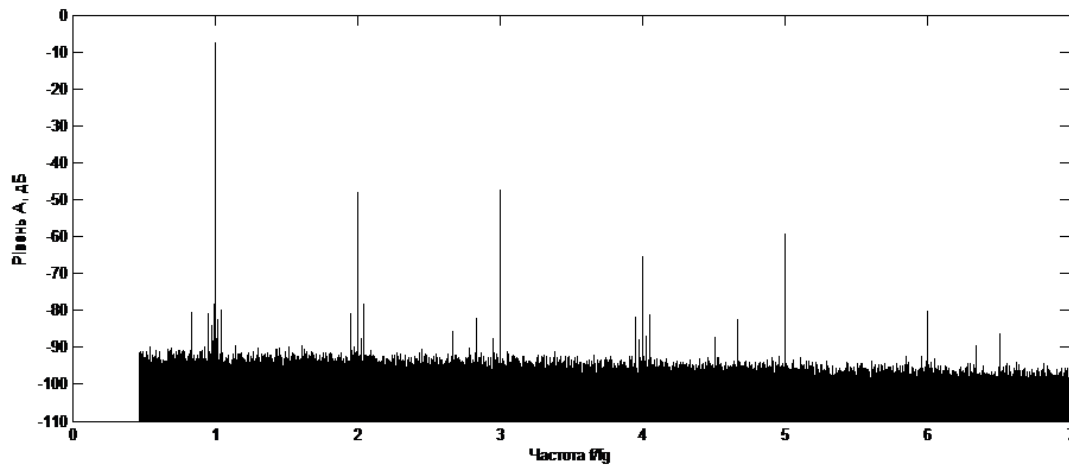


Рисунок 10 - Спектральна щільність коливань струни, закріпленої на металевій основі із пластичною деформацією

Висновок

Було розглянуто можливість застосування струнних датчиків для досліджень властивостей металу основи на якій їх встановлено. Розглянуто вплив мод коливання струни на металеву основу. Описано спосіб налаштування коливання струни для створення коливань із заданими модами. Проведено серію досліджень спектральної щільності коливань струни, закріпленої на основі із різними механічними властивостями. Знайдено вплив швидкості поширення поперечних коливань в досліджуваній основі на вид спектральної щільності коливань струни. Оскільки швидкість поширення коливань в металі є комплексною величиною, залежною від багатьох його фізичних властивостей, то можна стверджувати, що за допомогою струнних датчиків можна контролювати зміну фізичних властивостей металу деталей в процесі їх експлуатації.

1. ДСТУ-Н Б В.2.3-21:2008 Магістральні трубопроводи. Настанова. Визначення залишкової міцності магістральних трубопроводів з дефектами. 2. Савула Р.С./ Оцінка залишкової міцності ділянок магістральних газопроводів з дефектами/ Р.С. Савула, Є.В. Харченко, А. О. Кичма/ Науковий вісник ІФНТУНГ. 2012. № 2(32). 3. Стоев П.И., Мощенко В.И. Определение механических свойств металлов и сплавов по твердости // Вестник Харьковского научного университета им. Каразина. 2003. Т.601. № 2(22). С. 106-112. 4. Пояркова Е.В. Макромасштабные уровни

диагностики механического состояния металла высокотемпературных трубопроводов [Электронный ресурс] / Пояркова Е.В., Кузеев И.Р. Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2015. №4. Режим доступа: http://ogbus.ru/issues/4_2015/ogbus_4_2015_p283-312_PoyarkovaEV_ru.pdf 5. Патент 50914. Україна, МПК⁶ G01H5/00 Пристрій для вимірювання швидкості ультразвуку / Лютак І.З.; заявл. 27.02.2001 ; опублік. 15.11.2002, Бюл. № 11. – 5 с. 6. Стрілецький Ю.Й. Метод неруйнівного контролю стану стінок металевого трубопроводу за зміною коефіцієнта Пуассона. Методи та прилади контролю якості. 2016. №36 с/17-21. 7. Cawley, P., Lowe, M.J.S., Alleyne, D.N., Pavlakovic, B. and Wilcox, P. (2003) 'Practical long range guided wave inspection - applications to pipes and rail', *Materials Evaluation*, Vol 61, pp66-74. 8. Dan Mihai Stefañescu, Mirela Adelaida Anghel/ *Electrical methods for force measurement – A brief survey/Measurement* 46(2013) 946-959. 9. A.J. (Tony) Simmonds *Long term monitoring using vibrating wire sensors Instrumentation Techniques for Risk Mitigation /Annual Kansas City Specialty Seminar 2015 / Jan 9 2015* 10. Демьянов Ю. А. // Докл. РАН. 1999. Т.369. №4. С.461–465

Поступила в редакцію 28.11.2016 р.

Рекомендували до друку: докт.техн.наук, проф. Олійник А.П., докт. техн. наук, проф. Середюк О.Є.