

**ZESZYTY NAUKOWE NR 1(73)
AKADEMII MORSKIEJ
W SZCZECINIE**

EXPLO-SHIP 2004

Zbigniew Bobrowski, Jarosław Chmiel,
Lech Dorobczyński, Yury A. Kravtsov

**Układ ultradźwiękowy do pomiaru zmiennych naprężeń
w kadłubach statków**

Słowa kluczowe: pomiary odkształceń, układy samowzbudne

Zaproponowano samodrgający układ akustyczny do ciągłego monitorowania deformacji w kadłubach statków. Układ korzysta z ultradźwięków o dość wysokiej (rzędu 1 MHz) częstotliwości, wzbudzających materiał kadłuba. Zmiany naprężeń objawiają się w małych, ale mierzalnych zakresach częstotliwości drgań.

Zastosowany układ może być używany do monitorowania zmiennych naprężeń w kadłubach statków w warunkach silnego falowania, również podczas załadunku statku.

**Ultrasonic System for Monitoring Stress Changes
and Deformations in the Ship Hull**

Key words: deformation measurements, self-oscillating systems

A self-oscillating ultrasonic system is suggested for monitoring deformations in ship hulls. The system employs high frequency (about 1 MHz) ultrasounds exciting the hull material.

Stress changes manifest themselves in small but detectable variations of frequency in the self-oscillating system. The suggested system can be applied for continuous stress changes monitoring in high seas as well as in nearly fully laden ship conditions.

Wprowadzenie

Celem prezentowanego artykułu jest analiza możliwości stosowania akustycznych systemów samodrgających jako czujników zmiennych odkształceń i naprężeń w kadłubach statków. Czułość systemów samodrgających, w zakresie małych odkształceń jest wyższa od czułości innych systemów pomiarowych. Wysoka czułość tych systemów jest przyczyną szerokiego ich stosowania tak w radiotechnice [1 – 3], jak i w elektromechanice [4].

W artykule przeanalizowano dokładności pomiarów odkształceń i naprężeń za pomocą samodrgających układów ultradźwiękowych (UD).

1. Ultradźwiękowy układ pomiarowy

Szeroko rozpowszechnione układy pracujące impulsowo, stosowane w defektoskopii ultradźwiękowej [5], niestety nie są w stanie zapewnić dokładnych pomiarów odkształceń rzędu $0,5 \mu\text{m}$. Odkształcenia sprężyste takiej wartości są charakterystyczne dla płyt stalowych o wymiarach rzędu kilku metrów poddawanych naprężeniom rzędu 1 MPa. Aby dokonywać pomiarów takich wydłużeń, należałoby stosować impulsy UD o takim czasie trwania, by ich długość była znacznie mniejsza od $0,5 \mu\text{m}$ – np. $0,1 \mu\text{m}$. Ponieważ impuls powinien zawierać co najmniej 10 okresów fali, niezbędne jest stosowanie fal o długości mniejszej od $0,01 \mu\text{m}$. Dla materiałów stosowanych na kadłuby statków odpowiada to częstotliwości sygnału UD $f = v/\lambda$ powyżej 50 GHz. Sygnały o takich hiperdźwiękowych częstotliwościach ulegają zbyt silnemu tłumieniu w stali tak, że standardowe metody impulsowe defektoskopii ultradźwiękowej nie są przydatne do dokładnej oceny odkształceń sprężystych w stalowych płytach kadłuba statku.

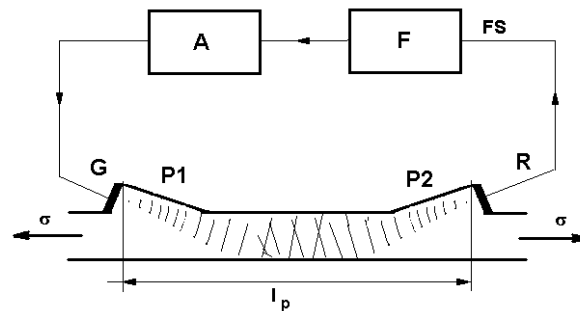
W odróżnieniu od systemów impulsowych, systemy samodrgające UD charakteryzują się znacznie większą dokładnością i zarazem wymagają stosowania niższych częstotliwości.

Z warunku, by połowa długości fali $\lambda/2$ była mniejsza od grubości płyty d (w takim przypadku płyta zachowuje się jak falowód jednomodowy) wynika, że częstotliwość fali powinna być wyższa od:

$$f = \frac{v}{\lambda} \approx \frac{v}{2d} = 10^5 \text{ Hz} \quad (1)$$

W następnych oszacowaniach przyjęte zostanie $f = 0,5 \text{ MHz}$, co odpowiada długości fali $\lambda \approx 0,01 \text{ m}$.

Fala o takiej długości może zostać wprowadzona do płyty i odebrana z pomocą pryzmatów P1 i P2, tak jak pokazano na rysunku 1 wraz z pozostałymi elementami układu UD. Generator G wzbudza drgania mechaniczne w płycie poprzez przetwornik piezoelektryczny, przymocowany do pryzmatu P1. Drugi przetwornik odbiera sygnał z pryzmatu P2 i kieruje go do obwodu sprzężenia zwrotnego FB, który zawiera wzmacniacz A i filtr wąskopasmowy F, który powinien odseparować jeden z możliwych modów generacji, żeby uniknąć międzymodowych skoków częstotliwości.

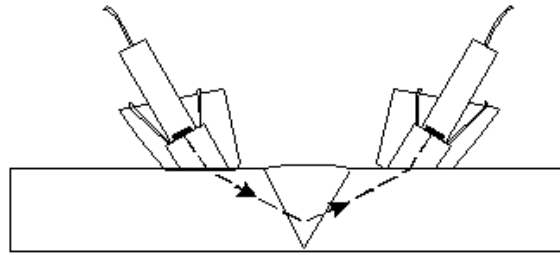


Rys. 1. Samodrgający ultradźwiękowy układ pomiarowy z zastosowaniem podłużnych fal ultradźwiękowych: G – generator, R – odbiornik, FS – pętla sprzężenia zwrotnego, A – wzmacniacz, F – filtr, P1, P2 – pryzmat nadawczy i odbiorczy
Fig. 1. Self-oscillating system using longitudinal ultrasonic waves

Podobnie jak w metodzie pomiarowej z użyciem tensometru strunowego [6], wskaźnikiem zmian naprężeń i odkształceń w płycie jest zmiana częstotliwości drgań własnych układu, powstających po zamknięciu obwodu sprzężenia zwrotnego.

Dla podanego zakresu częstotliwości, tj. 0,5 MHz są produkowane typowe przetworniki fali podłużnej o znacznej średnicy (do 60 mm) i mocy promieniowania. Trudność w ich stosowaniu polega na możliwości wprowadzania jedynie wiązki prostopadłej do powierzchni materiału. Wprowadzenie wiązki fal pod kątem wymaga zatem wykonania układów odchylających wiązkę oraz zapewnienia należytego sprzężenia w układzie przetwornik – element odchylający – materiał. Trudności takich nie stwarzają badania z wykorzystaniem fal poprzecznych. Typowe przetworniki fal poprzecznych – tak zwane głowice kątowe umożliwiają wprowadzanie wiązki pod kątem do około 75 stopni od normalnej. Częstotliwości tych przetworników są zdecydowanie wyższe (2,5 – 10 MHz). W ostatnich latach, w związku z rozwojem techniki TOFD (*Time-of-Flight Diffraction* – dyfrakcyjna metoda pomiarów czasu przejścia) [7, 8, 9] zaproponowano rozwiązanie pozwalające uzyskać zadowalającą jakość sprzęże-

nia w układzie głowicy fali podłużnej, użytej jako głowicy kątowej. Jest to system klinów wodnych (rys. 2) [10]. System ten usuwa trudności związane ze stosowaniem przetworników fali podłużnej o stosunkowo niskich częstotliwościach.



Rys. 2. Zastosowanie układu z klinami wodnymi do wzbudzenia poprzecznych fal ultradźwiękowych

Fig. 2. The system with water wedges for the excitation of transverse ultrasonic waves

2. Częstotliwość generacji

Częstotliwość drgań własnych f podlega równaniu bilansu fazowego:

$$2\pi f\tau + \varphi_G(f - f_G) + \varphi_F(f - f_F) = 2\pi m, \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (2)$$

które wymaga, by przesunięcie fazy w obwodzie sprzężenia zwrotnego było wielokrotnością 2π . Wielkości $\varphi_G(f - f_G)$ i $\varphi_F(f - f_F)$ są przesunięciami fazowymi wnoszonymi przez generator połączony z przetwornikiem P_1 oraz przez filtr. Oba te elementy mają charakter rezonansowy, przy czym f_G oraz f_F oznaczają ich częstotliwości rezonansu.

Zakładając, że różnice $f - f_G$ i $f - f_F$ są stosunkowo niewielkie, zależności $\varphi_G(f - f_G)$ i $\varphi_F(f - f_F)$ można przedstawić w postaci zlinearyzowanej:

$$\begin{aligned} \varphi_G(f - f_G) &\approx 2\pi\tau_G(f - f_G) \\ \varphi_F(f - f_F) &\approx 2\pi\tau_F(f - f_F) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\Delta f_G = f - f_G, \quad \Delta f_F = f - f_F$$

gdzie τ_G i τ_F są to opóźnienia w generatorze i filtrze, określone wzorami:

$$\tau_G = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d\varphi_G}{df}, \quad \tau_F = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d\varphi_F}{df} \quad (4)$$

Opóźnienia te są małe w porównaniu z czasem przebiegu $\tau = l/v$:

$$\tau_G \ll \tau, \quad \tau_F \ll \tau \quad (5)$$

Podstawiając równania (3) do równania (2) i dzieląc obustronnie przez 2π otrzymujemy:

$$f_\tau + \tau_g \Delta f_G + \tau_F \Delta f_F = m \quad (6)$$

Uwzględniając nierówności (5), rozwiążemy równanie (6) w ramach teorii zaburzeń. Zakładamy, że:

$$f = f_0 + \Delta f, \quad \tau = \tau_0 + \Delta \tau \quad (7)$$

gdzie τ_0 odpowiada początkowemu naprężeniu σ_0 i początkowej temperaturze T_0 oraz $\tau_0 = \tau_0(\sigma_0, T_0)$. Uwzględniając wzór (7) w zerowym przybliżeniu mamy:

$$f_0 = \frac{m}{\tau_0} \quad (8)$$

wtedy zaburzenie pierwszego rzędu wynosi:

$$\frac{\Delta f}{f_0} = -\frac{\Delta \tau}{\tau_0} - \frac{\tau_g}{\tau_0} \cdot \frac{\Delta f_G^0}{f_0} - \frac{\tau_F}{\tau_0} \frac{\Delta f_F^0}{f_0} \quad (9)$$

Różnice $\Delta f_{G,F}^0$ charakteryzują rozstrojenie między częstotliwością f_0 a częstotliwościami rezonansowymi nadajnika i filtru.

Liczba m we wzorach (20), (7) i (9) w przybliżeniu wskazuje na liczbę długości fal na odcinku l pomiędzy generatorem G i odbiornikiem R:

$$m \approx \frac{l}{\lambda}$$

Kiedy różnica $f_0^{m+1} - f_0^m = \frac{1}{\tau}$ między sąsiednimi częstotliwościami jest mała w porównaniu z częstotliwością generatora na poziomie 1/2 naprężenia maksymalnego, kilka częstotliwości zachowuje się zgodnie z równaniami (5) i (7). W takim przypadku możliwe są skokowe zmiany częstotliwości. Aby uniknąć wieloznaczności wskazane jest dobrać szerokość pasma przenoszenia filtru $\Delta f_{1/2}^F$ mniejsze od różnicy: $f_0^{m+1} - f_0^m = \frac{1}{\tau}$, a więc:

$$\Delta f_{1/2}^F \ll \frac{1}{\tau} \quad (10)$$

Spełnienie tej nierówności gwarantuje jednoznaczność interpretacji zmian częstotliwości w układzie samodrgającym.

2. Zależność częstotliwości drgań własnych od zmian naprężeń i temperatury

Czas przebiegu fali określa się wyrażeniem:

$$\tau = \frac{l}{v} = l \sqrt{\frac{\rho}{E}}, \quad (11)$$

gdzie v – prędkość dźwięku, ρ – gęstość materiału, E – moduł Younga. Względny przyrost czasu przebiegu wynosi zatem:

$$\frac{\Delta \tau}{\tau_0} = \frac{\Delta l}{l_0} + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\Delta \rho}{\rho_0} - \frac{\Delta E}{E_0} \right) \quad (12)$$

gdzie $\frac{\Delta l}{l_0}$, $\frac{\Delta \rho}{\rho_0}$, $\frac{\Delta E}{E_0}$ są to względne przyrosty długości, gęstości i modułu Younga. Jeżeli odkształcenie płyty wynosi $\varepsilon = \Delta l / l_0$, to w pierwszym przybliżeniu gęstość ρ i moduł Younga E zostaną zwiększone $(1 + \varepsilon)$ razy, tak że:

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = \frac{\Delta E}{E} = \varepsilon \quad (13)$$

W takim razie prędkość dźwięku v praktycznie nie ulega zmianom. Tłumaczy to istotną różnicę zachowania się materiałów metalicznych (np. stali) od materiałów porowatych, np. skał osadowych. W metalach prędkość dźwięku chociaż słabo, ale zależy od naprężeń, o czym świadczy tzw. efekt akustyczno-elastyczny [12]. W pierwszym przybliżeniu ten słaby efekt można pominąć.

Wskutek

$$\frac{\Delta\tau}{\tau_0} = \frac{\Delta l}{l_0}$$

mamy

$$\frac{\Delta\tau_e}{\tau_0} = \frac{\Delta l_e}{l_0}, \quad \frac{\Delta\tau_T}{\tau_0} = \frac{\Delta l_T}{l_0} \quad (13 \text{ a})$$

Przyrosty czasu przebiegu sygnału i długości płyty stalowej można przedstawić jako sumę dwóch składników:

$$\Delta\tau = \Delta\tau_e + \Delta\tau_T, \quad \Delta l = \Delta l_e + \Delta l_T \quad (13 \text{ b})$$

gdzie indeks „e” oznacza składową wywołaną odkształceniem sprężystym, a indeks „T” – deformacjom temperaturowym.

Na podstawie równania (9) możemy napisać:

$$\frac{\Delta f_e}{f_0} = -\frac{\Delta\tau_e}{\tau_0} = -\frac{\Delta l_e}{l_0}, \quad \frac{\Delta f_T}{f_0} = -\frac{\Delta\tau_T}{\tau_0} = -\frac{\Delta l_T}{l_0} \quad (14)$$

Przy odkształceniu sprężystym $\varepsilon_e = \frac{\Delta l_e}{l_0} = 5 \cdot 10^{-7}$ (wydłużenie dla płyty o długości 1 m pod wpływem naprężeń 100 kPa) i przy częstotliwości $f_0 = 500$ kHz, przesunięcie Δf_e wynosi:

$$\Delta f_e = 0,250 \text{ Hz}$$

Przy użyciu fal poprzecznych ($f_0 \approx 2,5$ MHz), przesunięcie częstotliwości Δf będzie w przybliżeniu 5 razy większe:

$$\Delta f_e = 1,250 \text{ Hz}$$

Przy zmianach temperatury $\Delta T \cong 1\text{K}$, względne wydłużenie stali $\Delta l_T/l_0$ wynosi (współczynnik rozszerzalności temperaturowej stali $\alpha \approx 15 \cdot 10^{-6} [\text{K}^{-1}]$):

$$\varepsilon_T = \frac{\Delta l_T}{l_0} \approx \alpha \Delta T \approx 1,5 \cdot 10^{-5} \quad (15)$$

tak, że:

$$\Delta f_T = 5 \cdot 10^5 \varepsilon_T \approx 7,5 [\text{Hz}] \quad (16)$$

i odpowiednio dla fal poprzecznych:

$$\Delta f_T \approx 37,5 [\text{Hz}] \quad (17)$$

Takie zmiany częstotliwości są nierealne.

4. Metody redukcji składnika temperaturowego

Metody zmniejszenia wpływu składnika temperaturowego na zmiany częstotliwości w układach tensometrów ultradźwiękowych są podobne jak przy zastosowaniu tensometru strunowego [5].

Po pierwsze, w warunkach quasi-okresowego działania falowania morza (okresy charakterystyczne są rzędu 10 s) skuteczną będzie filtracja górnoprzepustowa, która odseparuje zmiany o relatywnie wysokiej częstotliwości, wywołane falowaniem od długookresowych zmian natury cieplnej (dylatacyjnej) o okresach rzędu $\Delta t = 3000$ s.

Po drugie, ciepłe zmiany częstotliwości można skompensować za pomocą przesuwnika fazowego włączonego w obwód sprzężenia zwrotnego. Przesuwnik taki powinien zmienić fazę drgań własnych o wartość:

$$\Delta \varphi = K \cdot \Delta T \quad (18)$$

tak by skompensować ciepłe wydłużenia kadłuba.

Innym sposobem wydzielenia zmian częstotliwości pochodzących od falowania od zmian pochodzenia cieplnego jest zestawienie dwóch prostopadłych do siebie układów ultradźwiękowych, tak by jeden z nich nie podlegał działaniu badanych naprężeń. W takim przypadku różnica przesunięć częstotliwości:

$$\Delta f = f_1 - f_2 = \Delta f_1 - \Delta f_2 = \Delta f_{1e} + \Delta f_{1T} - \Delta f_{2T} = \Delta f_{1e} \quad (19)$$

będzie zawierała tylko składnik związany z odkształceniami sprężystymi z pierwszego układu. Składniki temperaturowe układu pierwszego i drugiego kompensują się wzajemnie.

W związku z tym możliwe jest zarejestrowanie składnika odkształceniowego Δf_{ie} za pomocą detektora fazowego, do którego należy przesłać sygnały z dwóch prostopadłych do siebie układów. Przy założeniu równości składników cieplnych w dwóch prostopadłych układach, różnica fazowa może być przedstawiona jako:

$$\Delta\varphi = \int \Delta f_{ie} dt \quad (20)$$

Szybkość zmiany fazy:

$$\frac{d(\Delta\varphi)}{dt}$$

wynosi około 1,5 [rad/s], przy $\Delta f \approx 0,25$ [Hz] według oszacowania dokonanego wyżej.

Prawdopodobnie ten sposób może okazać się najbardziej czułą metodą pomiarów zmiennych naprężeń w kadłubie statku, a jego realizacja nie powinna narażać problemów wykonawczych.

Podsumowanie

Analiza zagadnienia, oparta na rozważaniach własnych oraz źródeł literaturowych wykazała, że możliwe jest dokonywanie pomiarów naprężeń rzędu 0,1 MPa metodami ultradźwiękowymi. Tym samym możliwe jest zbudowanie układu ultradźwiękowego, dokonującego pomiarów naprężeń w kadłubie statku.

Literatura

1. Balney T. G., *Infrared and Millimeter Waves*, Vol 3. Part 2. NY Acad. Press 1980.
2. Khotuntsev Yu. L., Tamarchak D. Ya., *Synchronized generators and autodynes on semiconductors*, Radio i Sviaz, Moscow, 1982.
3. Shestopalov V. P., *Physical Foundations of the Millimeter and Submillimeter Waves Technique*, Vol 2: Sources. Element Base. Radio Systems. Novel Scientific Trends. VSP, Zeist, The Netherlands, 1997.
4. Jankowski J., *Wagi i ważenie w przemyśle i handlu*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1983.

5. Deputat J., *Nieniszczące metody badania własności materiałów*, Wyd. Biuro Gamma, Warszawa 1997.
6. Bobrowski Z., Chmiel J., Dorobczyński L., Kravtsov Yu. A., *Wykorzystanie tensometrów strunowych do pomiaru zmiennych naprężeń w kadłubach statków*, materiały III Międzynarodowej Konferencji Naukowo-Technicznej EXPLO-SHIP 2004 „Problemy eksploatacji obiektów pływających i urządzeń portowych”, Szczecin 2004, s. 31 – 39.
7. Schulze G.E.R., *Fizyka metali*, PWN, Warszawa 1982.
8. Ogilvy J. A., Temple J. A. G., *Diffraction of elastic waves by cracks: application to time-of-flight inspection*, Ultrasonics, 1983.
9. Deputat J., *Dyfrakcja fal ultradźwiękowych na szczelinie*, materiały seminarium „Ultradźwiękowe badania materiałów”, Zakopane 1997.
10. Mackiewicz S., *Skomputeryzowana metoda TOFD – Nowe podejście do badań spoin*, materiały seminarium „Ultradźwiękowe badania materiałów”, Zakopane 1997.
11. Mackiewicz S., Kopiński J., *Doświadczenia z zastosowań ultradźwiękowej techniki TOFD*, materiały seminarium „Nieniszczące badania materiałów”, Zakopane 2001.
12. Deputat J., Szelażek J., *Monitoring of stress changes with ultrasonic technique*, materiały seminarium “Advanced Course on Structural and Health Monitory”, Warszawa 2001.

Wpłynęło do redakcji w lutym 2004 r.

Recenzenci

dr hab. inż. Tadeusz Jastrzębski, prof. PS
dr hab. inż. Piotr Bielawski, prof. AM

Adresy Autorów

mgr inż. Zbigniew Bobrowski
prof. dr hab. Yury A. Kravtsov
Zakład Fizyki
dr inż. Jarosław Chmiel
Zakład Techniki i Technologii Transportu
dr inż. Lech Dorobczyński
Zakład Automatyki Okrętowej
Akademia Morska w Szczecinie
ul. Wały Chrobrego 1/2, 70-500 Szczecin