

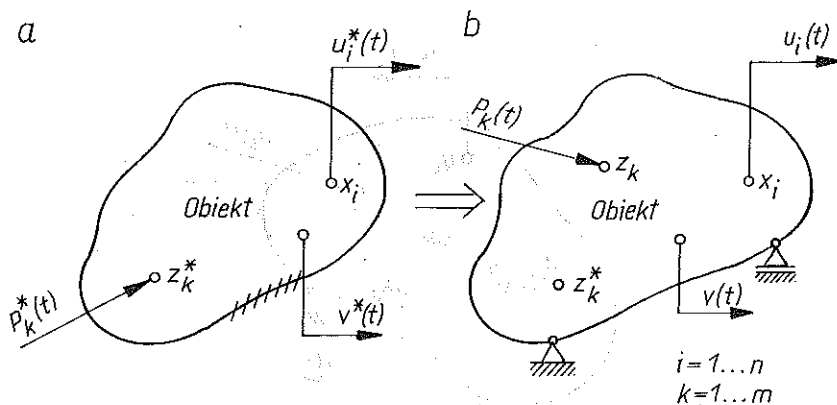
## DOKŁADNOŚĆ ODTWARZANIA SYGNAŁÓW W SYMULACYJNYCH BADANIACH STANOWISKOWYCH

WACŁAW GIERULSKI (KIELCE)

W pracy przedstawiono metodę oceny błędu odtwarzania sygnałów w symulacyjnych badaniach stanowiskowych. Ocena błędu dokonywana jest w punktach obiektu, w których nie są mierzone sygnały podczas rzeczywistej eksploatacji obiektu. Wskazano możliwość optymalnego doboru położenia punktów odtwarzania sygnałów, oraz przedstawiono przykład wyznaczania błędu.

### 1. WSTĘP

Przedstawione rozważania dotyczą badań stanowiskowych, podczas których w laboratorium na stanowisku badawczym odtwarzane są sygnały, jakie występują podczas rzeczywistej eksploatacji w wybranych punktach obiektu [4] (rys. 1). Podczas tego rodzaju badań na obiekt działają inne niż w warunkach rzeczywistej eksploatacji sygnały wymuszające, inne też są więzy narzucone na obiekt. Te inne warunki pracy obiektu sprawiają, że sygnały odtwarzane



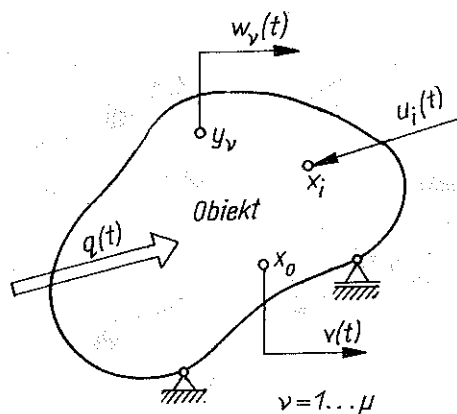
Rys. 1. Obiekt podczas rzeczywistej eksploatacji (a), oraz na stanowisku badawczym (b).  $u_i^*(t)$ ,  $u_i(t)$  – sygnały wymuszane (odtworzane),  $x_i$  – miejsca odtwarzania sygnałów,  $P_k^*(t)$ ,  $P_k(t)$  – sygnały wymuszające,  $z_k^*(t)$ ,  $z_k(t)$  – miejsca działania sygnałów wymuszających,  $n$  – liczba sygnałów odtwarzanych,  $m$  – liczba sygnałów wymuszających na stanowisku

obarczone są błędem. W pracy [2] przedstawiono pewną metodę syntezy sygnałów wymuszających, zapewniających minimalny błąd symulacji określony w dziedzinie częstości, będący miarą różnic między sygnałami otrzymywanymi na stanowisku badawczym a sygnałami odniesienia, czyli sygnałami występującymi podczas rzeczywistej eksploatacji obiektu. Ten błąd symulacji stanowi miarę podobieństwa sygnałów.

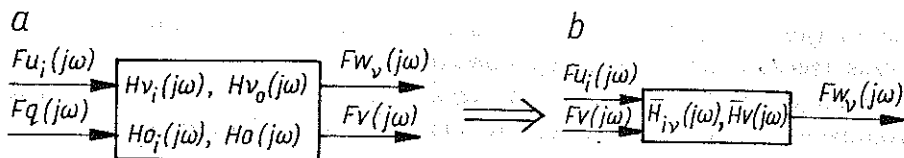
Po zapewnieniu podobieństwa sygnałów w pewnych wybranych punktach obiektu, należy spodziewać się podobieństwa sygnałów w pozostałych punktach obiektu. Określenie dokładności odtwarzania sygnałów w tych innych punktach obiektu badanego na stanowisku symulacyjnym jest tematem przedstawionej pracy. Dodac należy, że sygnały w tych punktach nie są mierzone podczas rzeczywistej eksploatacji obiektu.

## 2. METODA OCENY DOKŁADNOŚCI ODTWARZANIA SYGNAŁÓW

Na stanowisku badawczym oraz podczas rzeczywistej eksploatacji obiektu sygnały są mierzone tylko w pewnych wybranych punktach obiektu. Postawione zadanie wymaga aby w punktach, w których podczas rzeczywistej eksploatacji nie były mierzone sygnały, określić dokładność odtwarzania sygnałów na stanowisku badawczym. Potraktujemy mierzone sygnały  $u_i(t)$  jako znane sygnały wymuszające, natomiast sygnały  $P_k(t)$  włączymy do nieznanymi sygnałów zakłócających  $q(t)$  działających na obiekt. Na stanowisku badawczym mierzymy sygnały  $w_\nu(t)$  w punktach  $y_\nu$ , w których chcemy ocenić dokładność odtwarzania sygnałów oraz dodatkowy sygnał  $v(t)$  w dowolnie wybranym punkcie obiektu  $x_c$ . Są to sygnały wyjściowe (rys. 2). Po poddaniu



Rys. 2. Sygnały na stanowisku badawczym:  $y_\nu$  — miejsce oceny dokładności,  $w_\nu(t)$  — sygnał oceniany,  $v(t)$  — sygnał pomocniczy,  $x_0$  — miejsce pomiaru sygnału pomocniczego,  $q(t)$  — wymuszenie zastępcze,  $\mu$  — liczba ocenianych sygnałów



Rys. 3. Zależności między sygnałami

sygnałów transformacji Fouriera, zależności między sygnałami możemy przedstawić w postaci (2.1), (2.2), wprowadzając charakterystyki częstotściowe obiektu (rys. 3).

$$(2.1) \quad Fw_v(j\omega) = \sum_{i=1}^n H_{v_i}(j\omega) Fu_i(j\omega) + H_{v_0}(j\omega) Fq(j\omega),$$

$$(2.2) \quad Fv(j\omega) = \sum_{i=1}^n H_{o_i}(j\omega) Fu_i(j\omega) + H_o(j\omega) Fq(j\omega), \quad v = 1 \dots \mu,$$

gdzie  $Fw_v(j\omega)$ ,  $Fu_i(j\omega)$ ,  $Fq(j\omega)$ ,  $Fv(j\omega)$  oznaczają transformaty Fouriera sygnałów  $w_v(t)$ ,  $u_i(t)$ ,  $q(t)$ ,  $v(t)$ , zaś  $H_{v_i}(j\omega)$ ,  $H_{v_0}(j\omega)$ ,  $H_{o_i}(j\omega)$ ,  $H_o(j\omega)$  – charakterystyki częstotściowe obiektu.

Po wylimitowaniu ze związków (2.1), (2.2) sygnałów  $Fq(j\omega)$ , otrzymujemy związki między sygnałami w postaci (2.3), (rys. 3.b).

$$(2.3) \quad Fw_v(j\omega) = \sum_{i=1}^n \bar{H}_{v_i}(j\omega) Fu_i(j\omega) + \bar{H}_v(j\omega) Fv(j\omega), \quad v = 1 \dots \mu,$$

gdzie podstawiono:

$$(2.4) \quad \bar{H}_{v_i}(j\omega) = H_{v_i}(j\omega) - \frac{H_{o_i}(j\omega)}{H_o(j\omega)},$$

$$(2.5) \quad \bar{H}_v(j\omega) = \frac{H_{v_0}(j\omega)}{H_o(j\omega)},$$

$\bar{H}_{v_i}(j\omega)$ ,  $\bar{H}_v(j\omega)$  oznaczają tu charakterystyki częstotściowe obiektu.

Przyjmując, że charakterystyki częstotściowe obiektu podczas rzeczywistej eksploatacji i podczas badań na stanowisku są takie same, różnicę między sygnałami będącą miarą dokładności odtwarzania sygnałów w wybranym punkcie  $y_v$ , napiszemy w postaci

$$(2.6) \quad \Delta Fw_v(j\omega) = \sum_{i=1}^n \bar{H}_{v_i}(j\omega) \Delta Fu_i(j\omega) + \bar{H}_v(j\omega) \Delta Fv(j\omega).$$

Występujące w zależności (2.6) różnice sygnałów wynoszą odpowiednio

$$(2.7) \quad \Delta Fu_i(j\omega) = Fu_i^*(j\omega) - Fu_i(j\omega),$$

$$(2.8) \quad \Delta Fv(j\omega) = Fv^*(j\omega) - Fv(j\omega),$$

gdzie  $Fu_i^*(j\omega)$ ,  $Fv^*(j\omega)$  oznaczają transformaty Fouriera sygnałów mierzonych podczas rzeczywistej eksploatacji obiektu.

Obliczając błąd symulacji jako rzeczywistą funkcję części rzeczywistych i urojonych transformat Fouriera różnic sygnałów [2] otrzymamy

$$(2.9) \quad \delta_v(\omega) = [\operatorname{Re} \Delta Fw_v(\omega)]^2 + [\operatorname{Im} \Delta Fw_v(\omega)]^2$$

lub po uśrednieniu w przedziale częstości  $\omega_1, \omega_2$ , błąd symulacji w punkcie  $y_v$  przyjmie postać:

$$(2.10) \quad \varepsilon_v = \frac{1}{\varepsilon_0} \int_{\omega_1}^{\omega_2} \delta_v(\omega) d\omega.$$

Funkcja odniesienia  $\varepsilon_0$  przybiera wówczas następującą postać:

$$(2.11) \quad \varepsilon_0 = \int_{\omega_1}^{\omega_2} \{[\operatorname{Re} Fw_v(\omega)]^2 + [\operatorname{Im} Fw_v(\omega)]^2\} d\omega.$$

Po uwzględnieniu zależności (2.6) w (2.9) oraz (2.11) otrzymujemy dla każdego  $v = 1, \dots, \mu$

$$(2.12) \quad \delta_v(\omega) = \left\{ \sum_{i=1}^n [\operatorname{Re} \bar{H}_{v_i}(\omega) \operatorname{Re} \Delta Fu_i(\omega) - \operatorname{Im} \bar{H}_{v_i}(\omega) \operatorname{Im} \Delta Fu_i(\omega)] + \right. \\ \left. + \operatorname{Re} \bar{H}v(\omega) \operatorname{Re} \Delta Fv(\omega) - \operatorname{Im} \bar{H}v(\omega) \operatorname{Im} \Delta Fv(\omega) \right\}^2 + \\ + \left\{ \sum_{i=1}^n [\operatorname{Re} \bar{H}_{v_i}(\omega) \operatorname{Im} \Delta Fu_i(\omega) + \operatorname{Im} \bar{H}_{v_i}(\omega) \operatorname{Re} \Delta Fu_i(\omega)] + \right. \\ \left. + \operatorname{Re} \bar{H}v(\omega) \operatorname{Im} \Delta Fv(\omega) + \operatorname{Im} \bar{H}v(\omega) \operatorname{Re} \Delta Fv(\omega) \right\}^2,$$

$$(2.13) \quad \varepsilon_0 = \int_{\omega_1}^{\omega_2} \left\{ \left( \sum_{i=1}^n [\operatorname{Re} \bar{H}_{v_i}(\omega) \operatorname{Re} Fu_i^*(\omega) - \operatorname{Im} \bar{H}_{v_i}(\omega) \operatorname{Im} Fu_i^*(\omega)] + \right. \right. \\ \left. \left. + \operatorname{Re} \bar{H}v(\omega) \operatorname{Re} Fv^*(\omega) - \operatorname{Im} \bar{H}v(\omega) \operatorname{Im} Fv^*(\omega) \right)^2 + \right. \\ \left. + \left( \sum_{i=1}^n [\operatorname{Re} \bar{H}_{v_i}(\omega) \operatorname{Im} Fu_i^*(\omega) + \operatorname{Im} \bar{H}_{v_i}(\omega) \operatorname{Re} Fu_i^*(\omega)] + \right. \right. \\ \left. \left. + \operatorname{Re} \bar{H}v(\omega) \operatorname{Im} Fv^*(\omega) + \operatorname{Im} \bar{H}v(\omega) \operatorname{Re} Fv^*(\omega) \right)^2 \right\} d\omega.$$

Na podstawie (2.10) możliwe jest określenie błędu symulacji w punktach obiektu, w których nie są mierzone sygnały podczas rzeczywistej eksploatacji. Wykorzystanie tego wzoru możliwe jest dopiero po wyznaczeniu charakterystyk częstościowych obiektu.

### 3. IDENTYFIKACJA CHARAKTERYSTYK CZĘSTOŚCIOWYCH OBIEKTU

Wyznaczenie charakterystyk częstościowych metodami analitycznymi jest możliwe tylko dla prostych obiektów o własnościach liniowych. W rzeczywis-

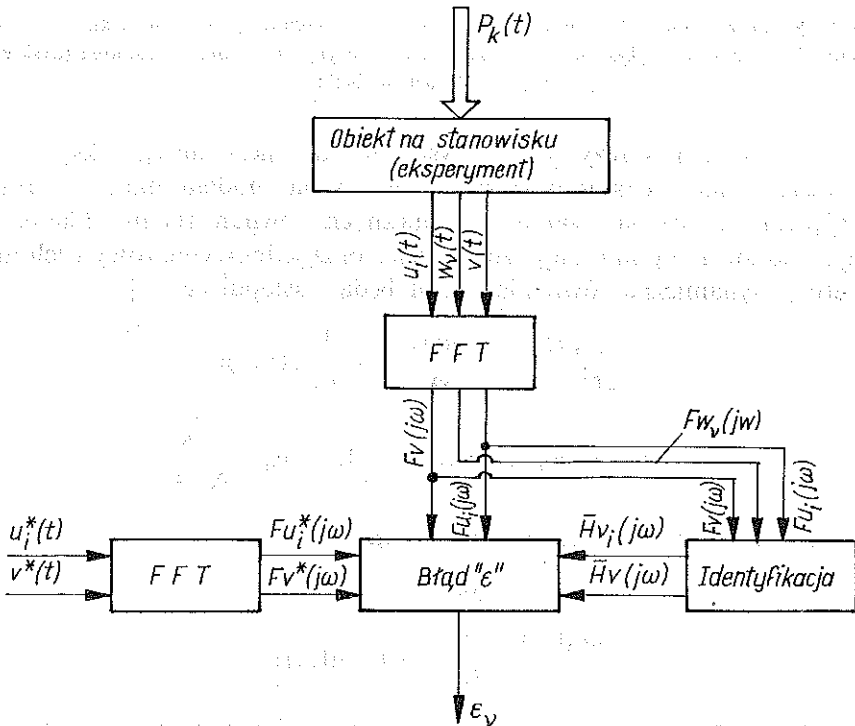
tych badaniach zachodzi konieczność wyznaczania tych charakterystyk drogą identyfikacji. Identyfikacji charakterystyk częstotściowych obiektu dokonuje się na podstawie wyników eksperymentu przeprowadzonego na stanowisku badawczym. W tym celu podczas eksperymentu mierzy się i rejestruje sygnały  $u_i(t)$ ,  $w_v(t)$ ,  $v(t)$ . Wyznaczając wzajemne i własne gęstości widmowe mocy sygnałów z równania (2.3), otrzymamy układ równań liniowych z niewiadomymi charakterystykami częstotściowymi [1]. Rozwiązanie tego układu w postaci macierzowej dla każdego  $v = 1 \dots \mu$  jest następujące:

$$(3.1) \quad [\bar{H}_v(j\omega)] = \left( \begin{bmatrix} Su_i u_k(j\omega) - Svu_k(j\omega) & \frac{Su_i v(j\omega)}{Svv(j\omega)} \end{bmatrix}^T \right)^{-1} \times \\ \times \begin{bmatrix} Sw_v u_i(j\omega) - Svu_i(j\omega) & \frac{Sw_v v(j\omega)}{Svv(j\omega)} \end{bmatrix}, \quad i = 1 \dots n, k = 1 \dots n$$

oraz

$$(3.2) \quad \bar{H}v(j\omega) = \frac{1}{Svv(j\omega)} \left\{ Sw_v v(j\omega) - \sum_{i=1}^n \bar{H}_v(j\omega) Su_i v(j\omega) \right\}.$$

We wzorach (3.1), (3.2) symbolami  $S$  z odpowiednimi indeksami oznaczono gęstości widmowe mocy sygnałów, symbolem  $[ ]^T$  oznaczono transpozycje oraz  $( )^{-1}$  — odwracanie macierzy.

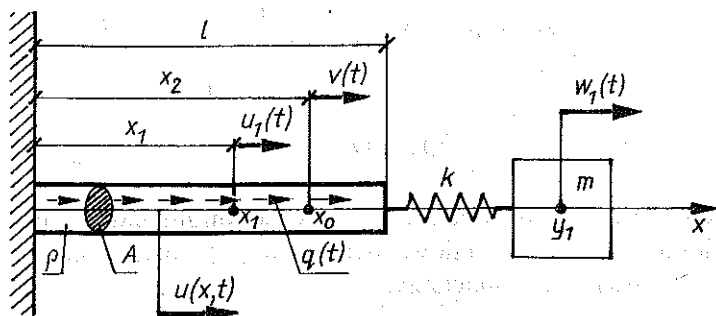


Rys. 4. Schemat procedury wyznaczania błędu

Po wydzieleniu części rzeczywistych i urojonych charakterystyk częstotliwościowych obiektu, na podstawie wzoru (2.10) wyznaczamy błąd symulacji w punkcie  $y_1$ . Kolejność działań określa procedura wyznaczania błędu symulacji (rys. 4).

#### 4. PRZYKŁAD OCENY DOKADNOŚCI ODTWARZANIA SYGNAŁÓW

W przedstawionym przykładzie obiekt stanowi układ dyskretno-ciągły (rys. 5), w którym cylindryczny pręt z utwierdzonym jednym końcem połączo-



Rys. 5. Przykładowy obiekt.  $l$  – długość belki,  $A$  – powierzchnia przekroju belki,  $\rho$  – gęstość materiału,  $E$  – moduł sprężystości,  $k$  – sztywność sprężyny,  $m$  – masa skupiona (dyskretna),  $q(t)$  – obciążenie belki

ny jest elementem sprężystym z dyskretną drgającą masą. Eksperyment rzeczywisty został zastąpiony eksperymentem na modelu matematycznym, polegającym na rozwiązywaniu dynamicznych równań ruchu układu. Zakładając jednoosiowy stan naprężeń w belce oraz jednowymiarowy ruch masy dyskretnej, dynamiczne równania ruchu będą następujące [3]:

$$(4.1) \quad \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial t^2} - a^2 \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial x^2} = \frac{1}{\rho A} q(x, t);$$

$$(4.2) \quad \ddot{w}_1(t) + \omega_0^2 [w_1(t) - u(l, t)] = 0, \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}},$$

przy następujących warunkach brzegowych:

$$(4.3) \quad u(0, t) = 0,$$

$$(4.4) \quad \frac{\partial u(l, t)}{\partial x} = \frac{k}{EA} [w_1(t) - u(l, t)].$$

$u(x, t)$  oznacza tu przemieszczenie płaszczyzny przekroju belki o współrzędnej

$x$ ,  $a = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$  – prędkość fali w materiale belki,  $E$  – moduł sprężystości,  $w_1(t)$  – przemieszczenie masy  $m$  oraz  $\omega_0$  – częstość własną układu dyskretnego.

Zakładając, że obciążenie belki jest jednakowe wzdłuż jej długości i przedstawiając je w postaci szeregu Fouriera, z zerową wartością średnią

$$(4.5) \quad q(x, t) = q(t) = \sum_{n=1}^{\infty} q_n \sin(\omega_n t - \gamma_n),$$

gdzie  $q_n$  oznacza amplitudy kolejnych wyrazów rozwinięcia,  $\gamma_n$  – kąt przesunięcia fazowego dla kolejnych harmonicznych oraz  $\omega_n$  – częstości kolejnych harmonicznych otrzymano rozwiązanie dla procesu ustalonego w postaci następujących szeregów:

$$(4.6) \quad u(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \left[ C_{1n} \cos \frac{\omega_n}{a} x + C_{2n} \sin \frac{\omega_n}{a} x + D_n \right] q_n \sin(\omega_n t - \gamma_n),$$

$$(4.7) \quad w_1(t) = \sum_{n=1}^{\infty} B_n \sin(\omega_n t - \gamma_n).$$

Stałe całkowania wynoszą tu odpowiednio

$$(4.8) \quad C_{1n} = -D_n = \frac{1}{\rho A \omega_n^2},$$

$$(4.9) \quad C_{2n} = \frac{\frac{\omega_n}{a} \sin \frac{\omega_n}{a} l - \frac{k}{EA} \frac{\omega_n^2}{\omega_0^2 - \omega_n^2} \left( 1 - \cos \frac{\omega_n}{a} l \right)}{\frac{\omega_n}{a} \cos \frac{\omega_n}{a} l - \frac{k}{EA} \frac{\omega_n^2}{\omega_0^2 - \omega_n^2} \sin \frac{\omega_n}{a} l} \cdot C_{1n},$$

$$(4.10) \quad B_n = \frac{\omega_n^2}{\omega_0^2 - \omega_n^2} \left[ C_{1n} \left( \cos \frac{\omega_n}{a} l - 1 \right) + C_{2n} \sin \frac{\omega_n}{a} l \right].$$

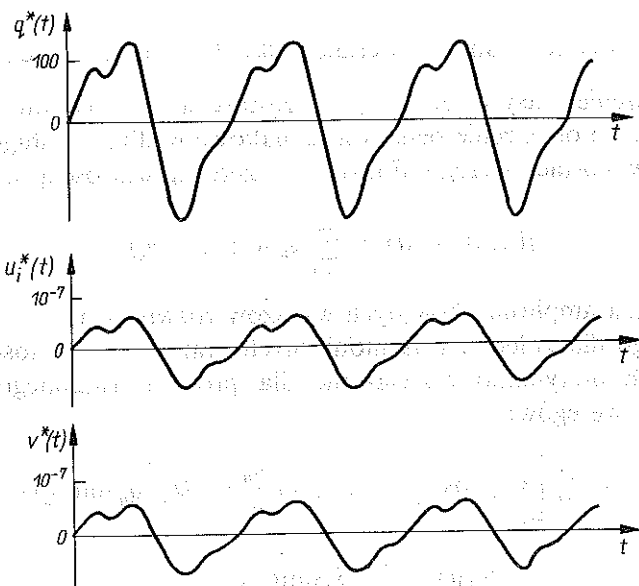
W rozważanym przykładzie  $\nu = 1$ ,  $i = 1$ . Przyjmijmy więc, że

$$(4.11) \quad u_1(t) = u(x_1, t),$$

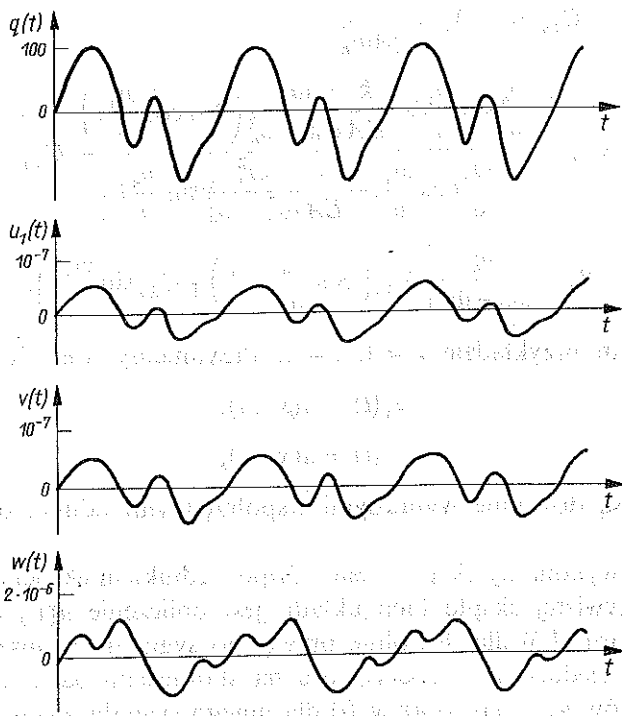
$$(4.12) \quad v(t) = u(x_2, t),$$

gdzie  $x_1$ ,  $x_2$  są dowolnie wybranymi współrzędnymi odmierzonymi wzdłuż belki.

Następnie wykonamy eksperyment. Odpowiednikiem eksperymentu w warunkach rzeczywistej eksploatacji układu jest obliczenie  $u_1^*(t)$  oraz  $v^*(t)$  na podstawie wzoru (4.6) dla dowolnie przyjętego sygnału wymuszającego  $q^*(t)$  (rys. 6). Odpowiednikiem eksperymentu na stanowisku badawczym jest obliczenie sygnałów  $u_1(t)$ ,  $v(t)$  oraz  $w_1(t)$  dla innego sygnału wymuszającego  $q(t)$  (rys. 7). Dodać należy, że w rzeczywistych badaniach sygnał  $q^*(t)$  nie jest znany.



Rys. 6. Sygnały w eksperymencie rzeczywistym



Rys. 7. Sygnały w eksperymencie na stanowisku

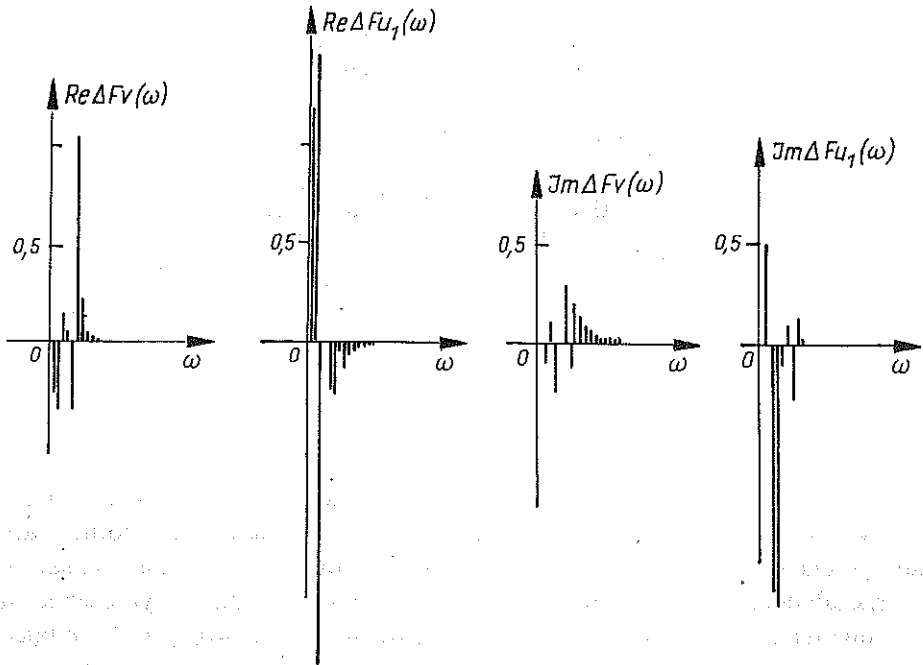


W rozwiązaniach oraz przy rozwijaniu funkcji  $q^*(t)$ ,  $q(t)$  w szeregi, uwzględniono jedynie cztery początkowe wyrazy. Po poddaniu sygnałów  $u_1(t)$ ,  $v(t)$ ,  $w_1(t)$  transformacji Fouriera i wyznaczeniu odpowiednich gęstości widmowych mocy, na podstawie (3.1, 3.2), otrzymano charakterystyki częstotściowe obiektu  $\bar{H}_{11}(j\omega)$  oraz  $\bar{H}v(j\omega)$ . Wzory te dla  $i = 1$ ,  $k = 1$  przyjmują postać

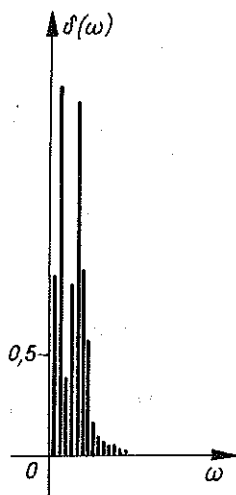
$$(4.13) \quad \bar{H}_{11}(j\omega) = \frac{S_{wu}(j\omega) - \frac{S_{wv}(j\omega)}{S_{vv}(j\omega)} S_{vu}(j\omega)}{S_{uu}(j\omega) - \frac{S_{uv}(j\omega)}{S_{vv}(j\omega)} S_{vu}(j\omega)}$$

$$(4.14) \quad \bar{H}v(j\omega) = \frac{1}{S_{vv}(j\omega)} [S_{wv}(j\omega) - \bar{H}_{11}(j\omega) S_{uv}(j\omega)].$$

Po wyznaczeniu na podstawie wzorów (2.7), (2.8) różnic sygnałów (rys. 8), z równań (2.12) wyznaczono błąd  $\delta_1(\omega)$  w funkcji częstotliwości (rys. 9). Następnie, po uśrednieniu go w przedziale częstotliwości  $0 \leq \omega \leq 128 \frac{\pi}{\tau}$ , wyznaczono błąd symulacji; wartość jego wynosi  $\varepsilon_1 = 0,105$ . W przedstawionym przykładzie możliwe jest obliczenie rzeczywistego błędu symulacji po wyznaczeniu sygnału  $w^*(t)$ . Wartość błędu wynosi  $\varepsilon_1^* = 0,091$ , różni się więc o 15,5% od błędu



Rys. 8. Różnice sygnałów w dziedzinie częstotliwości



Rys. 9. Błąd symulacji w dziedzinie częstotliwości

wyznaczonego proponowaną metodą. W przykładzie tym nie ubiegano się o zapewnienie minimalnego błędu symulacji (np. metodą syntezy sygnałów wymuszających [2]), dlatego też nie należy poddawać ocenie jego wartości. Wyniki te otrzymano drogą obliczeń numerycznych dla następujących danych liczbowych:

$$\begin{aligned}
 l &= 2 \text{ m}, & k &= 4000 \frac{\text{N}}{\text{m}}, \\
 A &= 0,001 \text{ m}^2, & m &= 5 \text{ kg}, \\
 \rho &= 8000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}, & E &= 2 \cdot 10^{11} \frac{\text{N}}{\text{m}^2}, \\
 & & x_1 &= 0,6 \text{ m}, \\
 & & x_2 &= 1,8 \text{ m}.
 \end{aligned}$$

## 5. UWAGI KOŃCOWE

Podczas badań symulacyjnych w kontrolowany sposób odtwarzane są sygnały w punktach  $x_i$  obiektu. Sygnały wymuszające należy tak dobrać, aby błąd symulacji obliczony w tych punktach był minimalny lub nie większy od dopuszczalnego. Punkty  $x_i$ , w których odtwarzane są sygnały wymuszane, są określone na podstawie programu badań symulacyjnych. Mogą być one także przyjmowane w sposób dowolny. Liczba tych punktów jest ograniczona; dąży się aby była minimalna, gdyż zwiększenie jej powoduje znaczny wzrost ilości

obliczeń podczas syntezy sygnałów wymuszających. Aby odtworzyć warunki pracy całego obiektu z odpowiednią dokładnością, należy wybrać punkty  $x_i$ , tak, aby błąd symulacji w innych punktach  $y$ , był nie większy od dopuszczalnego. Zmiana położenia punktów  $x_i$  powoduje zmiany charakterystyk częstotliwościowych  $\bar{H}v_i(j\omega)$ ,  $\bar{H}v(j\omega)$ . Dobór położenia punktów  $x_i$ , a więc i charakterystyk, dla zapewnienia odpowiednio małego błędu symulacji  $\varepsilon_v$  stanowi pewną optymalizację. Wyniki kolejno wykonywanych eksperymentów na stanowisku badawczym pozwalają określić sposób przemieszczenia punktów  $x_i$  dla zapewnienia mniejszej wartości błędu  $\varepsilon_v$ . Tak więc nie zwiększając liczby punktów  $x_i$ , w których w kontrolowany sposób odtwarzane są sygnały, a jedynie dobierając ich położenie, możliwe jest zmniejszenie błędu symulacji w pozostałych punktach obiektu.

W przedstawionej metodzie oceny dokładności odtwarzania sygnałów przyjęto, że charakterystyki częstotliwościowe obiektu podczas rzeczywistej eksploatacji i podczas badań na stanowisku są takie same. Stanowi to pewne ograniczenie możliwości stosowania tej metody dla obiektów wykazujących własności nieliniowe, a takimi są praktycznie wszystkie rzeczywiste obiekty. Daje ona prawidłowe wyniki w przypadkach, gdy rzeczywiste charakterystyki te są sobie równe lub dostatecznie bliskie, co można uzyskać z dala od obszarów rezonansowych przy zapewnieniu podobieństwa sygnałów na stanowisku oraz w trakcie rzeczywistej eksploatacji. W układach nieliniowych charakterystyki częstotliwościowe nie są stałe, zależą od sygnałów wymuszających, tak więc wyznaczane charakterystyki są słuszne tylko dla stosowanych do ich wyznaczania sygnałów oraz w ich otoczeniu. Stanowi to pewną linearyzację umożliwiającą stosowanie zasady superpozycji. W związku z tym w przypadku innych sygnałów wymuszających zachodzi konieczność ponownego wyznaczenia charakterystyk częstotliwościowych oraz błędu symulacji.

#### LITERATURA CYTOWANA W TEKŚCIE

1. S. BENDAT, G. PIERSOL, *Metody analizy i pomiaru sygnałów losowych*, PWN, Warszawa 1976.
2. W. GIERULSKI, *Synteza sygnałów wymuszających w badaniach stanowiskowych*, Rozpr. Inżyn., 37, 1, 1989.
3. S. KALISKI, *Drgania i fale*, PWN, Warszawa 1986.
4. J. OSIECKI, *Symulacja rzeczywistych obciążeń samochodu, jego zespołów i elementów na stanowiskach badawczych*, Prace PIMOT, Warszawa 1979.

## РЕЗЮМЕ

ТОЧНОСТЬ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ СИГНАЛОВ В ИМИТАЦИОННЫХ  
СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЯХ

В работе представлен метод оценки ошибки воспроизведения сигналов в имитационных стендовых испытаниях. Оценка ошибки производится в точках объекта, в которых не измеряются сигналы во время действительной эксплуатации объекта. Указана возможность оптимального подбора положения точек воспроизведения сигналов, а также представлен пример определения ошибки.

## SUMMARY

## SIGNAL REPRODUCTION ACCURACY IN SIMULATION TEST STANDS

Methods of evaluation of signal reproduction errors in simulation test stands are given. The errors are evaluated at the points of the object at which the signals are not measured during the actual operation time of the object. Possibility of optimal position of the signal reproduction points is shown, and an example of error evaluation is given.

POLITECHNIKA ŚWIĘTOKRZYSKA

*Praca została złożona w Redakcji dnia 10 listopada 1988 r.*