



**Barbara Misztal\***

## *Ocena przydatności różnych gatunków drewna do budowy konstrukcji*

### *The assessment of usability of various types of wood in construction*

#### *Wprowadzenie*

Trwałość konstrukcji drewnianych w prestiżowych obiektach uzależniona jest m.in. od racjonalnego wyboru i właściwości drewna zastosowanego do ich wykonania. Na ilustracji 1 przedstawiono drewnianą kopułę wybudowaną w 1320 r. jako zadaszenie jednej z wież widokowych pałacu Alhambra w Grenadzie. Kopuła ma wysokość 1,90 m i wymiary w rzucie:  $3,55 \times 3,55$  m. Wykonano ją z drewna cedrowego i topoli. Dzięki umiejętnościom jej twórców kopuła przetrwała 700 lat i można ją podziwiać w pawilonie Muzeum Sztuki Islamskiej w Muzeum Pergamońskim na Wyspie Muzeów w Berlinie.

Wybór drewna do budowy konstrukcji w obiektach prestiżowych jest zadaniem trudnym. Metodą powszechnie obecnie stosowaną jest metoda selekcji drewna polegająca na oględzinach elementów z drewna potrzebnego do budowy. Obiektywnych kryteriów wyboru dotychczas nie opracowano. W pracy [2] zwrócono uwagę na możliwość selekcji drewna do budowy konstrukcji na podstawie badań dynamicznych.

Celem artykułu jest pokazanie, jak na podstawie badań dynamicznych oszacować właściwości modeli z różnych gatunków drewna oraz określić ich przydatność do budowy trwałych konstrukcji. Jako kryterium przyjęto zmiany sztywności i modułu sprężystości tych modeli na skutek zawilgocenia. Opisano badania drgań swobodnych modeli z następujących gatunków drewna: sosny, świerku, modrzewia i dębu po 24-godzinnym moczeniu w wodzie.

#### *Introduction*

The durability of wood constructions in prestigious structures depends, e.g. on the rational selection of elements and properties of wood used for their construction. Figure 1 shows the wood dome built in 1320 as the roof of one of the viewing towers in the Alhambra palace in Grenada. The height of the dome is 1.90 m and its dimensions are  $3.55 \times 3.55$  m. It was made of cedar and poplar wood. Due to the skills of its builders the 700 years old original dome is on display and can be admired in the Islamic Art Museum in the Pergamon Museum on the Museum Island in Berlin.

The selection of wood for construction of prestigious structures is a difficult task. The universally applied wood selection method involves the inspection of elements made of wood needed for the construction. The objective selection criteria have not been determined yet. It is noted in [2] that there is a possibility of selection of wood for the construction of structures on the basis of dynamic tests.

The objective of the paper is to demonstrate how to estimate the properties of models built of different types of wood on the basis of dynamic tests and how to assess their usability for construction of durable structures. The changes in the stiffness and the elasticity of these models as a result of moisture have been assumed as the criterion for the selection. This paper describes the tests of free vibrations in the models made of the following types of wood: pine, spruce, larch and oak after submergence in water for 24 hours. It demonstrates which model is the least susceptible to degradation caused by moisture. The most moisture resistant types of wood are recommended for use in the construction.

\* Wydział Architektury Politechniki Wrocławskiej/Faculty of Architecture, Wrocław University of Technology.



Il. 1. Kopuła jednej z wież widokowych pałacu Alhambra w Grenadzie:

a) widok wnętrza zadaszonego kopułą [1], b) podniebienie kopuły (fot. B. Misztal), c) detale w zbliżeniu (fot. B. Misztal)

Fig. 1. The dome of one of the viewing towers in the Alhambra palace in Grenada:

a) view of the interior with a dome roof [1], b) interior of the dome (photo by B. Misztal), c) closer view of details (photo by B. Misztal)

Pokazano, który z modeli ulega najmniejszej degradacji spowodowanej wilgocią. Gatunki drewna najbardziej odporne na wpływ wilgoci rekomenduje się do stosowania w konstrukcji.

### Metody badań

Do badań przygotowano modele z desek o przekroju  $10 \times 40$  mm, długości 1200 mm po 24-godzinnym moczeniu w wodzie. W ruch drgający wprowadzono modele obciążone wspornikowo jak na ilustracji 2.

Przed doświadczeniem deski zważono w stanie powietrznosuchym. Po badaniach dynamicznych desek suchych moczone je w wodzie przez 24 godziny. Po tym czasie deski ważono ponownie, obliczając ich wilgotność wagową. Obciążenie wymuszające przykładano na końcu wspornika prostopadłe do płaszczyzny mniejszej sztywności belki. W celu ograniczenia wpływu drgań drugiego rzędu umieszczono masę skupioną  $m = 250,0$  g na końcu wspornika.

Badano częstość  $n$  i tłumienie  $\rho$  drgań swobodnych wymuszonych impulsem za pośrednictwem obciążenia  $P = 250,0$  g zawieszono na końcu wspornika. Drgania wzbudzano poprzez przecięcie zawiesia utrzymującego obciążenie. Przeprowadzono badania wpływu zawilgocecia belek drewnianych na częstość  $n$  i tłumienie  $\rho$  drgań swobodnych. Parametry ruchu drgającego  $T$ ,  $\rho$ ,  $\omega$ ,  $\Delta$ , pokazane w tabelach: 1–4, wyznaczono na podstawie numerycznych wyników pomiarów za pomocą arkuszy kalkulacyjnych EXCEL.

### Wyniki

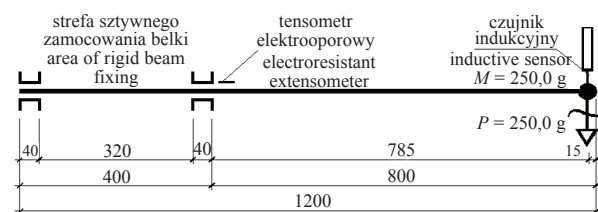
W tabeli 1 przedstawiono wyniki badań modelu z deski sosnowej po 24-godzinnym moczeniu w wodzie. Na wykresie (il. 3) pokazano przebieg drgań w czasie pierwszych 10 s badania. W tabelach (2–4) i na wykresach przedstawiono wyniki badań i drgania dla modeli z desek: świerkowej (tab. 2, il. 4), modrzewiowej (tab. 3, il. 5) i dębowej (tab. 4, il. 6), badanych po 24-godzinnym moczeniu w wodzie.

### Research methods

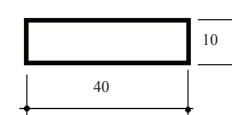
The tests were conducted on models made of dry wood beams,  $10 \times 40$  mm in cross section and 1200 mm long, after being submerged in water for 24 hours. The vibrations were induced to the cantilever beams fixed as shown in Figure 2.

The boards were weighed before the tests in dry air. After the dynamic tests of the dry boards, they were submerged in water for 24 hours. After that period, the boards were weighed again, calculating their weight moisture. The load was applied at the end of the beam perpendicularly to the plane of lower stiffness of the beam. A concentrated mass of  $m = 250.0$  g was placed at the end of the beam to limit the influence of secondary vibrations.

The test included the measurement of frequency  $n$  and absorption  $\rho$  of free vibrations induced by impulse from load  $P = 250.0$  g suspended at the end of the beam. The vibrations were induced by cutting the suspension of the load. The influence of moisture of wood beams on frequency  $n$  and absorption  $\rho$  of free vibrations was tested. The parameters of the vibratory movement  $T$ ,  $\rho$ ,  $\omega$ ,  $\Delta$ , shown in Tables: 1–4, were calculated on the basis of



a) Schemat belki do badań dynamicznych/Schematic diagram of a beam for dynamic testing



b) przekrój/section

Il. 2. Model badawczy testowanych belek

Fig. 2. Model of beams being tested

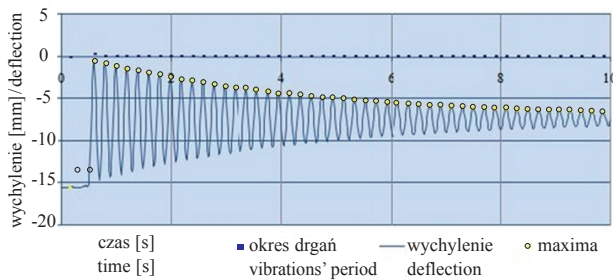
Tabela 1. Parametry ruchu drgającego modelu z sosny o wilgotności 56,62% (il. 3)

Table 1. The parameters of the vibratory movement of the model made of pinewood with moisture of 56.62% (Fig. 3)

$T_m$	$t_0$	$y_0$	$\rho_m$	$n_m = 1/T$	$\omega_m$	$\varphi$	$\Delta_m$
[s]	[s]	[mm]	[1/s]	[1/s]	[°]	[°]	
0,197	0,506	15,57	0,241	5,076	31,8	3,21	0,047

Legenda do tabel 1–4/Legend to Tables 1–4:

$T_m$  – okres drgań/period of vibrations,  $t_0$  – czas początkowy/initial time,  $y_0$  – maksymalne wychylenie/maximum deflection,  $\rho_m$  – tłumienie drgań/damping of vibrations,  $n_m$  – częstość drgań modelu/vibration frequency of the model,  $\omega_m$  – prędkość kołowa drgań tłumionych/circular speed of damped vibration,  $\varphi$  – przesunięcie fazowe/phase displacement,  $\Delta_m$  – logarytmiczny dekrement tłumienia/logarithmic damping decrement. Indeks  $m$  oznacza stan mokry modelu/Index  $m$  means wet model of wood.



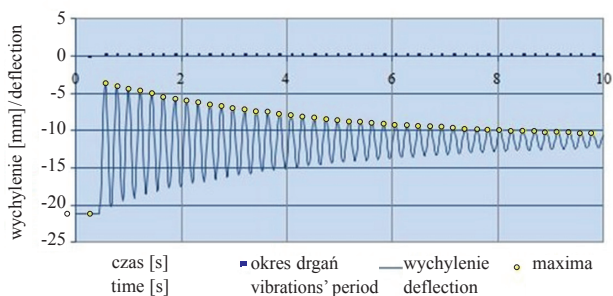
Il. 3. Zapis ruchu drgającego modelu z sosny o wilgotności 56,62% w czasie pierwszych 10 s badań

Fig. 3. The vibratory movement of the model made of pinewood with moisture of 56.62% over the first 10 s of the test

Tabela 3. Parametry ruchu drgającego modelu z modrzewia o wilgotności 25,93% (il. 5)

Table 3. The parameters of the vibratory movement of the model made of larch with moisture of 25.93% (Fig. 5)

$T_m$	$t_0$	$y_0$	$\rho_m$	$n_m = 1/T$	$\omega_m$	$\varphi$	$\Delta_m$
[s]	[s]	[mm]	[1/s]	[1/s]	[1/s]	[°]	
0,22	0,4533	21,16	0,256	4,54	28,56	9,524647	0,056



Il. 5. Zapis ruchu drgającego modelu z modrzewia o wilgotności 25,93% w czasie pierwszych 10 s badań

Fig. 5. The vibratory movement of the model made of larch with moisture of 25.93% over the first 10 s of the test

numerical results of the measurements with the use of Excel spreadsheets.

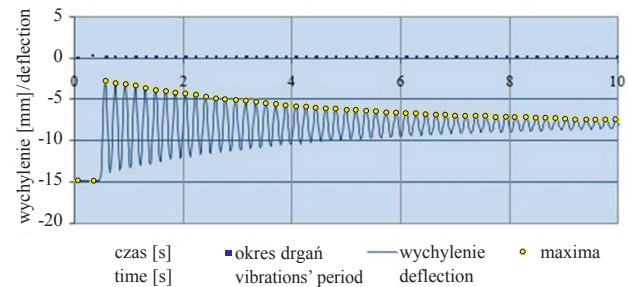
## Results

Table 1 presents the test results of the model made of pinewood boards after submergence in water for 24 hours. The graph in Fig. 3 shows the course of vibrations over the first 10 s of the test. Tables (2–4) and the graphs

Tabela 2. Parametry ruchu drgającego modelu ze świerku o wilgotności 34,92% (il. 4)

Table 2. The parameters of the vibratory movement of the model made of spruce with moisture of 34.92% (Fig. 4)

$T_m$	$t_0$	$y_0$	$\rho_m$	$n_m = 1/T$	$\omega_m$	$\varphi$	$\Delta_m$
[s]	[s]	[mm]	[1/s]	[1/s]	[1/s]	[°]	
0,187	0,4667	14,85	0,26	5,348	33,6	-3,51436	0,048



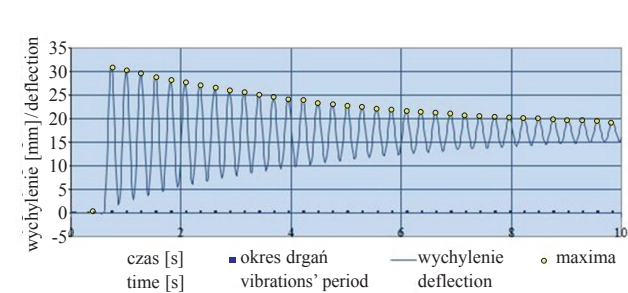
Il. 4. Zapis ruchu drgającego modelu ze świerku o wilgotności 34,92% w czasie pierwszych 10 s badań

Fig. 4. The vibratory movement of the model made of spruce with moisture of 34.92% over the first 10 s of the test

Tabela 4. Parametry ruchu drgającego modelu z dębu o wilgotności 23,00% (il. 6)

Table 4. The parameters of the vibratory movement of the model made of oak with moisture of 23.00% (Fig. 6)

$T_m$	$t_0$	$y_0$	$\rho_m$	$n_m = 1/T$	$\omega_m$	$\varphi$	$\Delta_m$
[s]	[s]	[mm]	[1/s]	[1/s]	[1/s]	[°]	
0,267	0,6	30,118	0,236	3,745	23,53	15,876	0,063



Il. 6. Zapis ruchu drgającego modelu z dębu o wilgotności 23,00% w czasie pierwszych 10 s badań

Fig. 6. The vibratory movement of the model made of oak with moisture of 23.00% over the first 10 s of the test



### Analiza wyników badań dynamicznych

We wszystkich przypadkach tłumione drgania swobodne, niezależnie od gatunku drewna, dobrze opisywała funkcja (1) według [3]:

$$y_t = y_0 e^{-\rho t} \cos(\sqrt{\alpha^2 - \rho^2} t + \varphi), \quad (1)$$

gdzie:

- $\alpha$  – częstość drgań własnych,
- $\rho$  – wymiarowe tłumienie drgań,
- $\varphi$  – przesunięcie fazowe.

Prędkość kołowa drgań tłumionych:

$$\omega = \sqrt{\alpha^2 - \rho^2} \quad (2)$$

Prędkość kołową drgań swobodnych  $\omega$  [°] i tłumienie  $\rho$  [1/s] wykorzystano do obliczenia sztywności rzeczywistej i modułu sprężystości podłużnej badanych belek. Wyniki zestawiono w tabelach: 5 i 6.

W pracy [3] podano związki między sztywnością  $K$ , masą  $m$ , prędkością drgań  $\omega$  i tłumieniem  $\rho$ . Pomijając lepkość  $\eta$ , można oszacować lokalną sztywność efektywną  $K_{ef}$  pręta z wzoru:

$$K_{ef} = m_z \alpha^2 \quad (3)$$

Zastępczą masę skupioną  $m_z$  obliczono z wzoru (4) według [4]:

$$m_z = 0,243ql + 250, \quad (4)$$

gdzie:  $q$  – pomierzony ciężar na 1 mb wspornika.

Z porównania przemieszczeń  $y = Pl^3/3E_m J$  i  $y = P/K_{ef}$  otrzymano równanie (5):

$$\frac{Pl^3}{3E_m J} = \frac{P}{K_{ef}} \quad (5)$$

Moduł sprężystości podłużnej  $E$  otrzymano z równania (6):

$$E_m = \frac{K_{ef} l^3}{3J} \quad (6)$$

### Wnioski

Procedurę wyboru najlepszego gatunku drewna do budowy konstrukcji na podstawie stosowanych do tej pory oględzin lub badań długotrwałych warto uzupełnić o obiektywne parametry uzyskane na podstawie badań drgań swobodnych elementów z drewna.

Z przeprowadzonej analizy drgań swobodnych modeli drewnianych wynika, że gatunki o większej przydatności do konstrukcji wykazywały w badaniach dynamicznych mniejsze okresy drgań, wyższe częstości, mniejsze tłumienie wymiarowe i mniejszy logarytmiczny dekrement tłumienia.

Jako kryterium przydatności drewna do długotrwałej pracy w konstrukcji można przyjąć spadek wartości modułu sprężystości na skutek zawilgocenia. W opisanych badaniach najmniejszy spadek wartości modułu  $E$  wykazuje drewno sosny.

Na podstawie pomiarów drgań swobodnych można jakościowo uszeregować gatunki drewna badanych modeli do długotrwałego zastosowania w konstrukcji według przydatności: sosna, modrzew, dąb, świerk.

show the test results and vibrations for the models made of spruce, larch, and oak boards tested after being submerged in water for 24 hours.

### Analysis of dynamic tests

In all cases the absorbed free vibrations, regardless of the variety of wood, were well described by the following function (1) according to [3]:

$$y_t = y_0 e^{-\rho t} \cos(\sqrt{\alpha^2 - \rho^2} t + \varphi), \quad (1)$$

where:

- $\alpha$  – own vibration frequency,
- $\rho$  – dimensional vibration damping
- $\varphi$  – phase displacement.

Circular speed of absorbed vibrations:

$$\omega = \sqrt{\alpha^2 - \rho^2} \quad (2)$$

The circular speed of free vibrations  $\omega$  [°] and the damping  $\rho$  [1/s] were used to calculate the actual stiffness and the modulus of direct elasticity of the beams under testing. The results are listed in Tables 5 and 6.

[3] presents the relationship between stiffness  $K$ , mass  $m$ , speed of vibrations  $\omega$ , and absorption  $\rho$ . If viscosity  $\eta$  is ignored, the local effective stiffness  $K_{ef}$  of the rod can be calculated with the following formula:

$$K_{ef} = m_z \alpha^2 \quad (3)$$

The equivalent concentrated mass  $m_z$  was calculated from formula (4) according to [4]:

$$m_z = 0.243ql + 250, \quad (4)$$

where:  $q$  – measured weight per 1 linear meter of beam

The comparison of movements  $y = Pl^3/3E_m J$  and  $y = P/K_{ef}$  gave the following equation (5):

$$\frac{Pl^3}{3E_m J} = \frac{P}{K_{ef}} \quad (5)$$

The longitudinal elasticity modulus  $E$  was calculated from equation (6):

$$E_m = \frac{K_{ef} l^3}{3J} \quad (6)$$

### Conclusions

The procedure of the selection of the best type of wood for construction on the basis of the inspections or long-lasting tests applied so far should be extended to include the objective parameters established on the basis of the tests of free vibrations of the elements made of wood.

The analysis of free vibrations conducted on the models made of wood indicates that the types of wood with a greater usability for construction demonstrated in the dynamic tests smaller periods of vibrations, higher frequencies, smaller dimension absorption and smaller logarithmic decrement of absorption.

The reduction in the value of the elasticity modulus as a result of moisture could be assumed as the criterion of usability of wood for long-term application in construction. The smallest reduction in the value of modulus  $E$  in the described tests was demonstrated by pinewood.

Tabela 5. Porównawcze zestawienie sztywności i modułów sprężystości podłużnej  $E_s$  modeli badanych w stanie powietrznosuchym z pracy [5]  
Table 5. The comparison of stiffness and longitudinal elasticity modulus  $E_s$  of dry tested models [5]

Parametry dynamiczne modeli w stanie powietrznosuchym badanych według il. 2 Dynamic parameters of dry models tested according to Fig. 2						$m_z$	$K = m_z \alpha_s^2$	$E_s$ modeli w stanie powietrznosuchym $E_s$ of dry models	$E$ wg normy $E$ per standard
materiał material	masa modelu model weight	masa rów. rozłożona uniformly distributed weight	$\rho_s$	$\omega_s$	drżania własne free vibrations				
			$\rho_s^2$	$\omega_s^2$	$\alpha_s^2 = \rho_s^2 + \omega_s^2$				
	[g]	[g/m]	[1/s]	[1/s]	[1/s <sup>2</sup> ]	[g]	[g/s <sup>2</sup> ]	[GPa]	[GPa]
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Sosna Pine wood	260,70	178,15	0,14	33,80		285,498	326170,1	17,98	11÷14
			0,0196	1142,44	1142,46				
Świerk Spruce wood	224,58	153,46	0,1724	36,3168		280,578	370065,5	20,40	
			0,0297	1318,91	1318,94				
Modrzew Larch wood	267,60	182,86	0,1485	30,01375		286,437	258035,6	14,23	
			0,0220	900,825	900,847				
Dąb Oak wood	314,42	214,85	0,1673	24,835		292,811	180607,3	9,96	brak danych w normie no data within norm
			0,028	616,777	616,805				

Tabela 6. Porównawcze zestawienie sztywności i modułów sprężystości podłużnej  $E_m$  modeli badanych po 24-godzinnym moczeniu w wodzie  
Table 6. The comparison of stiffness and longitudinal elasticity modulus  $E_m$  of the models tested after being submerged in water for 24 hours

Parametry dynamiczne modeli mokrych badanych według il. 2 The dynamic parameters of wet models tested per Fig. 2						$m_z$	$K = m_z \alpha_s^2$	wilgotność moisture	$E_m$ modeli mokrych $E_m$ of wet models	Zmniejszenie $E$ Decrease $E$
materiał material	masa modelu model weight	masa rów. rozłożona uniformly distributed weight	$\rho_m$	$\omega_m$	$\alpha_m^2 =$					
			$\rho_m^2$	$\omega_m^2$	$\rho_m^2 + \omega_m^2$					
	[g]	[g/m]	[1/s]	[1/s]	[1/s <sup>2</sup> ]	[g]	[g/s <sup>2</sup> ]	[%]	[GPa]	[%]
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Sosna Pine wood	408,30	279,00	0,2411	31,811		305,594	309260,05	56,6	17,05	5,0
			0,0581	1011,94	1011,998					
Świerk Spruce wood	308,52	210,82	0,2636	33,6		292,008	329685,65	34,9	18,18	10,9
			0,0695	1128,96	1129,0295					
Modrzew Larch wood	337,00	230,28	0,2562	28,5664		295,886	241474,01	25,9	13,31	6,5
			0,06565	816,04	816,106					
Dąb Oak wood	386,70	264,23	0,236	23,5325		302,650	167618,73	23,0	9,24	7,2
			0,0557	553,78	553,836					

Krótkie testy dynamiczne warto polecić do selekcji drewna potrzebnego do budowy konstrukcji, a także do wykrywania elementów zawilgoconych lub uszkodzonych w już wybudowanych obiektach.

On the basis of the measurements of free vibrations, the types of wood used in the tested models can be qualitatively ranked for long-term application in construction according to their usability: pine, larch, oak, spruce.

The short dynamic tests are worth recommending for the selection of wood needed for the construction and also for detecting wet or damaged elements in already built structures.

### ***Bibliografia/References***

- [1] Brisch K., *Kuppeldach aus dem Aussichtsturm des Torre de las Damas (Damenturm)*, Foto: Bundesarchiv, Staatliche Museen zu Berlin.
- [2] Misztal B., *Kształtowanie kopuł z drewna jednolitego*, Oficyna Wydawnicza PWR, Wrocław 2012.
- [3] Kowal Z., *Dynamika nieważkiej belki na podporach lepkosprężystych*, „Archiwum Inżynierii Lądowej” 1966, Nr 1(12), 29–42.
- [4] Banasiak M. (red.), *Ćwiczenia laboratoryjne z wytrzymałości materiałów*, PWN, Warszawa 1985.
- [5] Misztal B., *Oszacowanie efektywnej sztywności i modułu sprężystości różnych gatunków drewna na podstawie pomiarów drgań swobodnych*, „Architectus” 2014, Nr 1(37), 81–87.

### ***Streszczenie***

W artykule opisano badania dynamiczne modeli z drewna sosnowego, świerkowego, modrzewiowego i dębowego. Przeprowadzono je w celu poznania właściwości modeli z różnych gatunków drewna na podstawie danych uzyskanych z badań drgań swobodnych elementów. Zbadano modele powietrznosuche i po 24-godzinym moczeniu w wodzie. Przebieg drgań każdego z modeli zilustrowano na wykresie. Pokazano metodę szacowania efektywnej sztywności i modułu sprężystości podłużnej  $E$  różnych gatunków drewna. Celem badań było określenie, jak zmienia się efektywny moduł sprężystości drewna na skutek zawilgocenia.

**Słowa kluczowe:** moduł sprężystości podłużnej, drgania swobodne, tłumienie drgań swobodnych

### ***Abstract***

The paper describes the dynamic testing of models made of pine, spruce, larch and oak wood. The testing was conducted in order to learn the properties of planks on the basis of data obtained from the testing of free elements' vibration. Planks dried in air and after a 24 hours' soaking in water were tested. The course of the vibration of each of the models was illustrated on a graph. The calculations of the determination of elements' stiffness, and of the modulus of direct elasticity  $E$  for various wood species were shown. The aim of the testing was to determine how the modulus of elasticity varies due to wetting.

**Key words:** modulus of longitudinal elasticity, free vibration, damping of free vibration