

Elektroniczny układ pomiarowy wykrywania położenia swobodnego końca łopatki wirnika

Streszczenie. W artykule przedstawiono elektroniczny układ dokładnego wykrywania położenia końca łopatki wirnika. Układ taki wykorzystuje się przy pomiarach amplitudy drgań wierzchołka łopatki wirnika. W pomiarach drgań zastosowano metodę Tip-Timing, która polega na pomiarze czasu obrotu wału razem z drgającą łopatką. Drgania łopatki zmieniają wartość czasu obrotu łopatki. Typowy czujnik pomiaru położenia końca łopatki jest czujnikiem indukcyjnym reluktancyjnym. Dla uniknięcia fluktuacji fazy sygnałów, zastosowano specjalną konstrukcję komparatora analogowego z konwersją do sygnału impulsowego.

Abstract. The article presents an electronic system for accurate detection of the position of the rotor blade tip. Such a system is used for measuring the amplitude of rotor blade vibrations. In the vibration measurements, the Tip-Timing method was used, which consists in measuring the rotation time of the shaft and blade. The vibration of the blade changes the value of the rotation time of the blade. A typical blade tip position sensor is an inductive reluctance sensor. In order to avoid signal phase fluctuations, a special construction of an analog comparator with conversion to a pulse signal was used. (Electronic position detection measuring system the free end of the impeller blade)

Słowa kluczowe: łopatka wirnika, metoda Tip-Timing, drgania swobodne końca łopatki, komparator sygnału analogowego.

Keywords. rotor blade, Tip-Timing method, free vibration of the blade end, analog signal comparator.

Wstęp

W artykule opisano bardzo istotny szczegół, dotyczący elektronicznego pomiaru położenia swobodnego końca łopatki maszyny wirnikowej. Problem ten poruszają prace [1], [2] i [3]. Konstrukcję wirnika maszyny przedstawiono na rysunku 1. W czasie eksploatacji wirnika turbiny, swobodne końce łopatek ulegają drganiom. Jeżeli wartość amplitudy drgań będzie zbyt duża, to następuje zmęczeniowe pęknięcie łopatek. Proces pęknięcia łopatek jest zjawiskiem złożonym. Należy w trakcie eksploatacji wirnika dokonywać dokładnych pomiarów położenia swobodnego końca łopatki. Zastosowana technika pomiarowa bazuje na metodach elektronicznych związanych z dokładnym pomiarem czasu. W artykule przedstawiono elektroniczny układ pomiarowy dokładnego wykrywania położenia swobodnego końca łopatki maszyny wirnikowej.

Obecnie wykorzystuje się sprawdzoną metodę pomiarową o nazwie Tip-Timing. Zestawienie artykułów o metodzie Tip-Timing (88 poz.) zawiera praca [1] oraz [6-8]. Istotą tej metody jest pomiar czasowego położenia swobodnego końca łopatki. Pomiar wartości amplitudy drgań dokonuje się określając różnice czasowe położenia wierzchołka łopatki dla łopatki drgającej i niedrgającej. Istotę pomiaru przedstawiono na rysunku 2. W korpusie maszyny wirnikowej umieszczono czujniki C_B i C_W . Czujnik C_B wykrywa chwilę pojawienia się wierzchołka łopatki. Czujnik C_W wykrywa kolejny pełny obrót wału wirnika. Przebiegi C_B - $B1$ ÷ C_B - $B4$ przedstawiają sygnały analogowe na wyjścia czujnika położenia wierzchołka łopatki. Sygnały $B1$ ÷ $B4$ są sygnałami impulsowymi, wykorzystywanymi do pomiaru czasów $T_{\alpha 1}$ ÷ $T_{\alpha 4}$. Łopatki wirnika oznaczono symbolami # $B1$ ÷ # $B4$. Dla zmniejszenia fluktuacji fazy w układzie pomiaru czasów $T_{\alpha 1}$ ÷ $T_{\alpha 4}$, należy zapewnić sygnał impulsowy w chwilach zmiany polaryzacji sygnału analogowego (oznaczonego na rysunku 2 czerwonym znacznikiem X).

Reluktancyjny czujnik indukcyjny oraz schemat blokowy elektronicznego układu komparatora położenia końca łopatki

W układzie pomiarowym użyto (sprawdzonego w pomiarach tego typu) indukcyjnego czujnika reluktancyjnego. Jest to czujnik firmy JAQUET-Variable Reluctance Speed Sensor DSE 1210.25/26/27 AHZ. Na rysunku 3 przedstawiono schemat blokowy elektronicznego

układu wykrywania położenia końca łopatki maszyny wirnikowej. W skład tego układu wykrywania wchodzi:

1. Stalowa łopatka wirnika – czujnik reaguje na magnetyczne materiały z jakiego wykonano łopatkę,
2. Przetwornik indukcyjny (indukcyjny czujnik reluktancyjny) wykorzystujący napięcie samoindukcji w cewce, przy zmianach natężenia pola magnetycznego wywołwanego przez stalową łopatkę. Czujnik składa się z magnesu stałego (neodymowego) i nawiniętej na nim cewki. Zmiany wartości natężenia pola magnetycznego powodują indukowanie się na końcówkach cewki napięcia analogowego $\pm A_e$ samoindukcji o kształcie przedstawionym na rysunku 4.
3. Wzmacniacz analogowy, wzmacniający sygnał z czujnika do wartości napięcia umożliwiającego poprawną pracę komparatora,
4. Bufor separujący sygnał analogowy umożliwiający jego przesył z użyciem jako przewodu skrętki ekranowanej,
5. Bufor separujący sygnał impulsowy, umożliwiający przesył sygnału z użyciem światłowodu lub skrętki ekranowanej,
6. Komparator o specjalnej konstrukcji (będącego przedmiotem opisu tego artykułu). Komparator zamienia sygnał analogowy na sygnał impulsowy. Sygnał impulsowy pojawia się dokładnie w chwili zmiany polaryzacji sygnału analogowego. Dzięki specjalnej konstrukcji sygnału analogowego, osiągnięto minimalne fluktuacje fazy sygnału impulsowego.



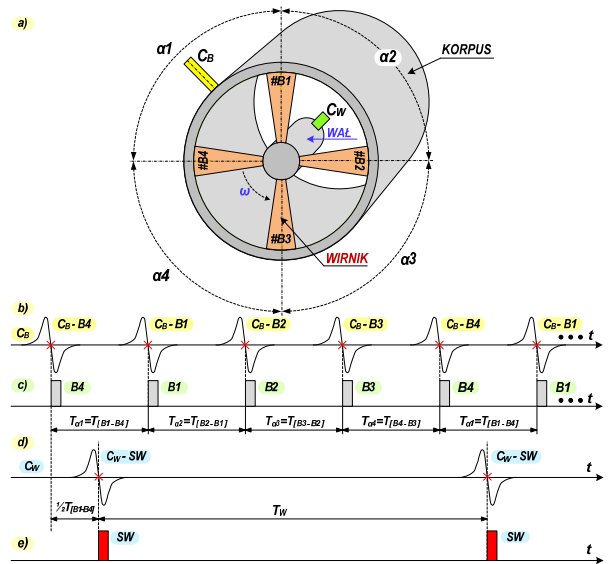
Rys.1. Widok wirnika maszyny wirnikowej turbiny parowej

Komparator wejściowego sygnału analogowego z wyjściem impulsowym

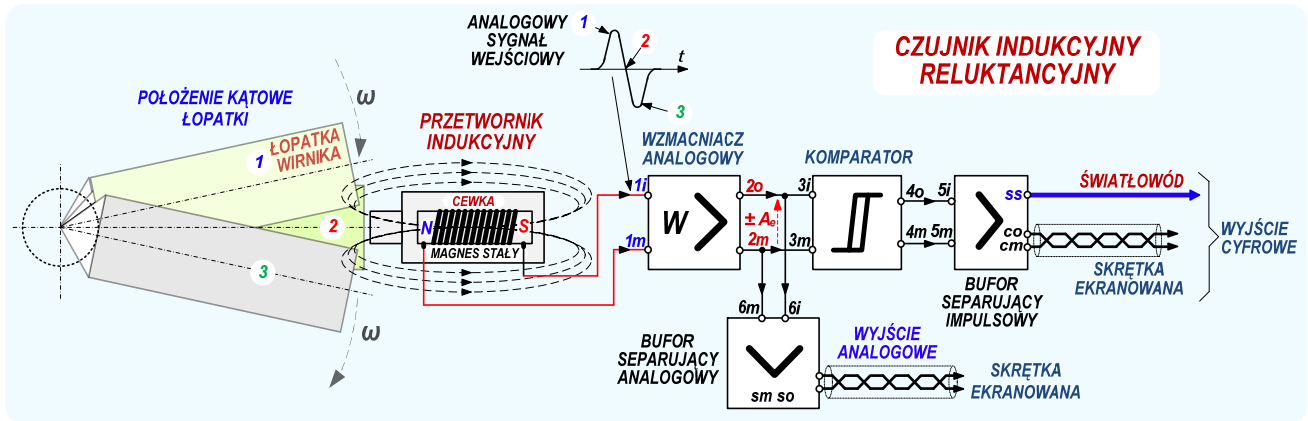
Na rysunku 5 przedstawiono schemat ideowy układu komparatora z histerezą. Elementem podstawowym jest wzmacniacz operacyjny IC pracujący jako komparator. Do wejścia (-) komparatora doprowadzono sygnał analogowy U_{WE} . W przedstawianym przypadku jest to sygnał o kształcie sinusoidy. Histerezę osiągnięto przez zastosowanie dodatniego sprzężenia zwrotnego. Napięcie U_{WY} z wyjścia komparatora podano poprzez dzielnik rezystorowy R_2 , R_H na wejście (+) komparatora IC. Wartość napięcia histerezy U_H określa wzór (1).

$$(1) \quad U_H = U_{WY} \left(\frac{R_H}{R_H + R_2} \right)$$

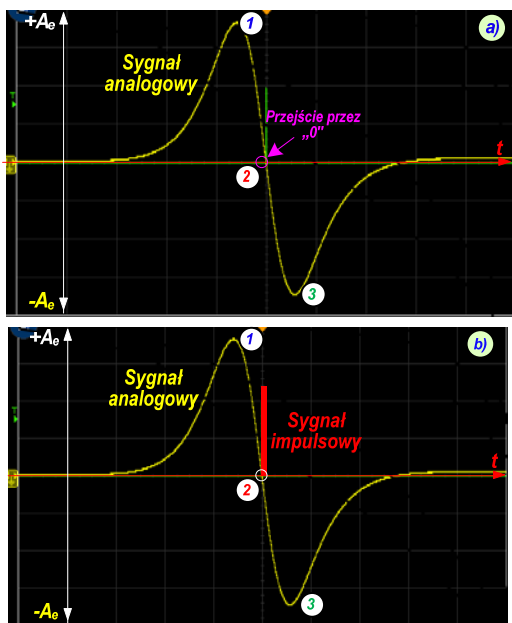
Na rysunku 6 przedstawiono przebiegi sygnałów w układzie komparatora z histerezą. Jeżeli wartość napięcia wejściowego U_{WE} przekroczy wartość napięcia $+U_H$, to napięcie wyjściowe U_{WY} zmieni polaryzację na ujemną w chwili czasowej t_A . Zgodnie z wzorem (1) nowa wartość napięcia U_H będzie ujemna. Na wyjściu komparatora wartość napięcia $-U_{WY}$ będzie tak długo, dopóki wartość napięcia wejściowego U_{WE} nie będzie większa od wartości napięcia $-U_H$. Zjawisko takie wystąpi w chwili czasowej t_B , wtedy napięcie U_{WY} zmieni polaryzację na dodatnią



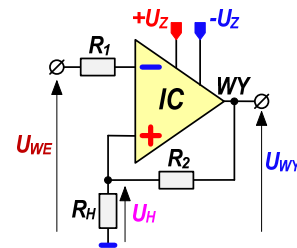
Rys.2. Zasada pomiaru czasowego położenia swobodnego końca łopatkę metodą Tip-Timing



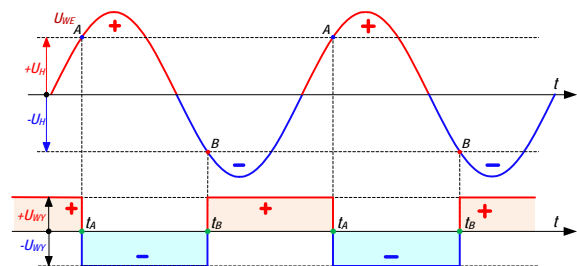
Rys.3. Schemat blokowy elektronicznego układu wykrywania dokładnego położenia końca łopatkę maszyny wirnikowej



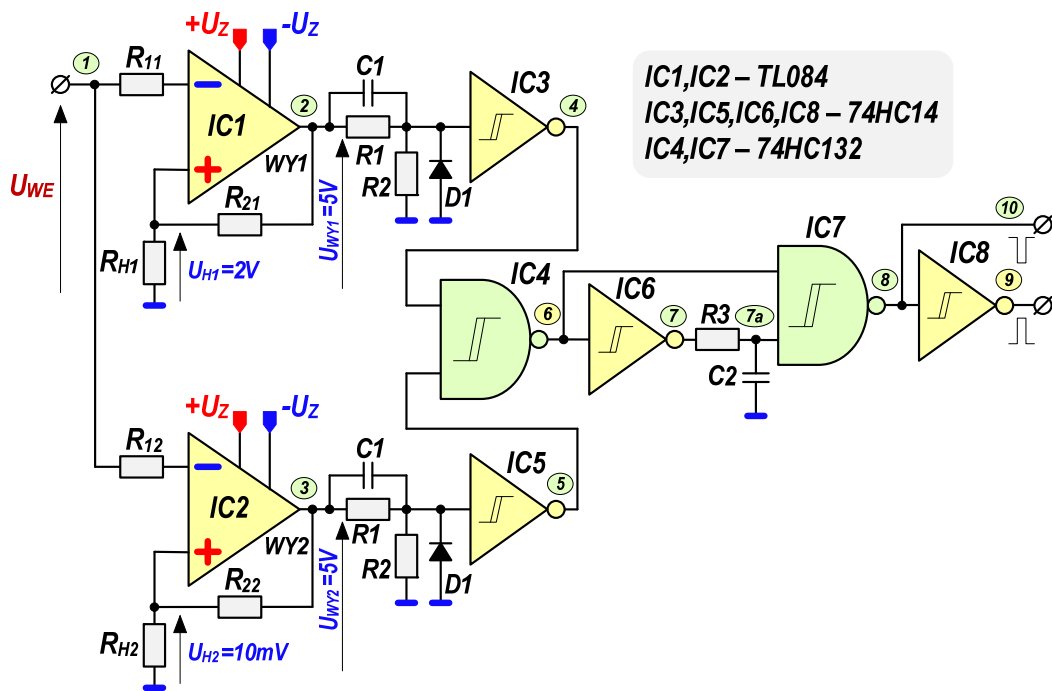
Rys.4. Sygnał analogowy otrzymywany na końcówkach cewki indukcyjnego czujnika reluktancyjnego



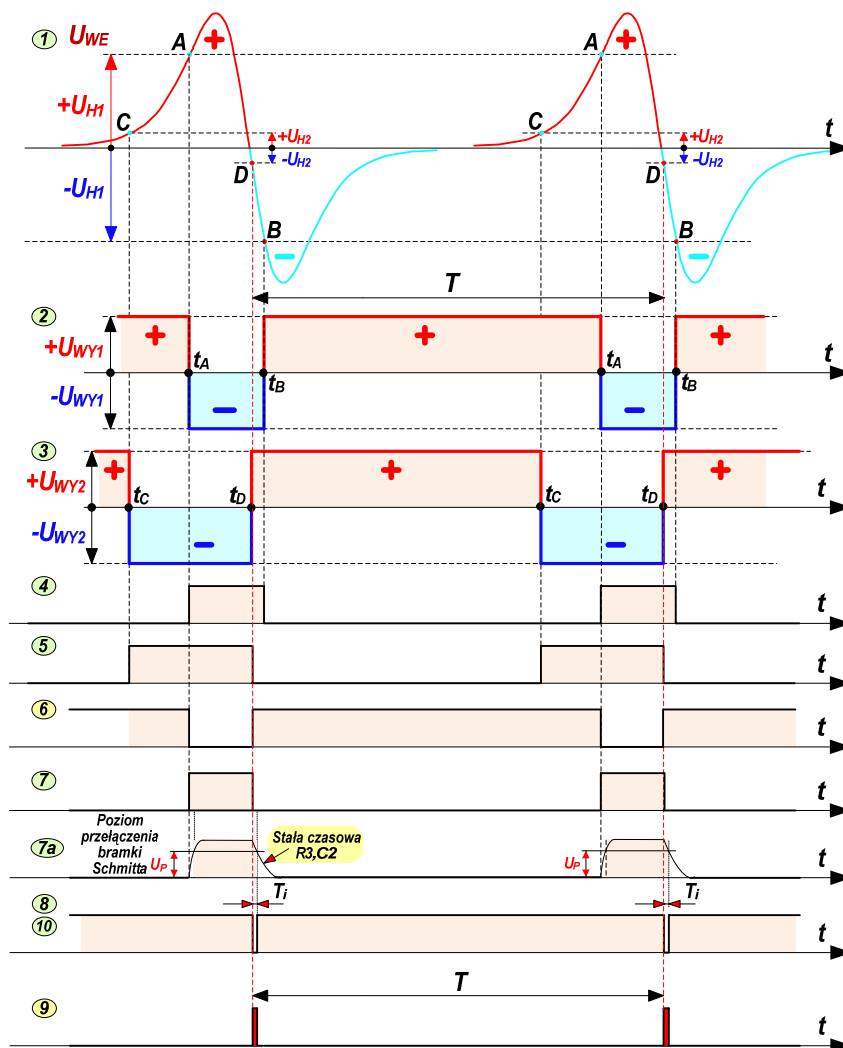
Rys.5. Schemat ideowy komparatora z histerezą



Rys.6. Przebiegi czasowe sygnałów w układzie wg rysunku 5



Rys.7. Schemat ideowy układu wykrywania przejścia przez „0” sygnału analogowego z wyjścia czujnika reluktancyjnego



Rys.8. Przebiegi czasowe w układzie wg rys.7 do wykrywania zmiany polaryzacji sygnału analogowego z wyjścia czujni

Dwu-komparatorowy konwerter wejściowego sygnału analogowego na wyjściowy sygnał impulsowy

Na rysunkach 4 i 8 (część 1) przedstawiono sygnał analogowy otrzymywany na wyjściu czujnika indukcyjnego reluktancyjnego. Próba zamiany takiej postaci sygnału analogowego na sygnał impulsowy z wykorzystaniem pojedynczego komparatora nie dała poprawnych efektów. Przy małej wartości napięcia histerezy U_H , układ jest bardzo podatny na zakłócenia.

Dlatego zaprojektowano układ przedstawiony na rysunku 7, składający się z dwóch komparatorów IC1 i IC2. Komparator IC1 posiada wysoką wartość napięcia progowego $U_{H1} = 2V$. Komparator IC2 posiada niską wartość napięcia progowego $U_{H2} = 10mV$. Do wyjść komparatorów IC1 i IC2 przyłączono wejścia bramek logicznych IC3 i IC5. Bramki wykonano w technologii CMOS - 74HC14 z wejściem Schmitta. Sygnały logiczne z bramek IC3 i IC5 podano na wejścia logiczne bramki IC4 - 74HC132. Jest to bramka logiczna NAND. Na rysunku 8 (część 4, 5 i 6) pokazano wzajemną relację pomiędzy tymi sygnałami. W chwili czasowej t_D na wyjściu bramki IC4 pojawia się stan wysoki. Multiwibrator monostabilny zbudowany z bramek IC6 i IC7 wytwarza impuls o stałym czasie trwania T_1 . Wartość czasu T_1 określają rezystor R3 i kondensator C2. Na rysunku 8 (część 7,7a,8,9,10) przedstawiono przebiegi sygnałów od chwili zaistnienia stanu wysokiego na wyjściu bramki IC4.

Istotnym jest to, że impuls o czasie trwania T_1 rozpoczyna się w chwili zmiany polaryzacji napięcia analogowego wg rysunku 8 przebieg 1 (dokładnie po osiągnięciu progu $-U_{H2}$). Niezależnie od kształtu przebiegu analogowego, zmiana polaryzacji sygnału (określana jako przejście przez „0”) występuje zawsze poprawnie. Na schemacie wg rysunku 8 dzielnik rezystorowy R1 i R2 dopasowuje poziom sygnału z wyjścia komparatorów IC1 i IC2 do poziomu sygnałów wymaganych przez wejścia bramek IC3 i IC5. Dioda D1 blokuje sygnał o polaryzacji ujemnej. Sygnał taki występuje na wyjściu komparatora wg rysunku 8 (część 2 i 3). Kondensator C1 razem z rezystorem R1, R2 i pojemnością wejściową bramek IC3 i IC5 tworzą skompensowany dzielnik napięcia poprawiający zmniejszenie czasu narastania impulsu na wyjściu bramek.

Chcąc zmniejszyć fluktuację fazy pomiędzy impulsami o okresie T , ustawiono wstępnie wzmocnienie wzmacniacza analogowego (rys.3) tak, żeby przy stałej wartości prędkości obrotowej wału wirnika otrzymać stałą wartość szybkości opadania napięcia pomiędzy wartością napięcia $+U_{WE}$ i $-U_{WE}$. Przy zmianie wartości prędkości obrotowej wału wirnika, zastosowano we wzmacniaczu analogowym układ ARW (Automatyczny Regulator Wzmocnienia). Układ ARW zapewnia stałą wartość szybkości opadania napięcia pomiędzy wartością napięcia $+U_{WE}$ i $-U_{WE}$, a tym samym minimalizuje fluktuację fazy.

Dużą odporność komparatora na zakłócenia osiągnięto przez blokowanie komparatora o małej wartości napięcia U_{H2} . Blokadę wykonuje komparator o

dużej wartości napięcia U_{H1} . Żeby komparator IC2 mógł zadziałać, musi zostać odblokowany przez komparator IC1. Takie odblokowanie jest możliwe tylko w przypadku wykrycia napięcia sygnału U_{WE} o wartości amplitudy większej od wartości napięcia U_{H1} . Poziom tego napięcia wskazuje, że jest to sygnał pochodzący z czujnika indukcyjnego, a nie sygnał zakłócający.

Wnioski

Przedstawiony elektroniczny układ wykrywania zmiany polaryzacji sygnału analogowego z jednoczesnym generowaniem w tym samym czasie impulsu o stałej długości czasowej T_1 pozwala na poprawne (bez zakłóceń) pomiary położenia końca łopatek wirnika. W ten sposób zminimalizowano przypadkowe fluktuacje fazy sygnału impulsowego. Ma to bardzo istotne znaczenie przy pomiarach różnicy czasów położenia końca łopatki, kiedy występują drgania końca łopatki. Fluktuacje fazy zakłócają pomiar czasu pomiędzy impulsami pochodzącymi od końca (wierzchołka) łopatki. Przedstawiony układ zastosowano m. in. przy pomiarach drgań łopatek turbiny parowej o mocy 370 MW, bezpośrednio w elektrowni.

Autorzy:

dr hab. inż. Jan Iwaszkiewicz, e-mail: j.iwaszkiewicz@we.umg.edu.pl,
dr inż. Leszek Piechowski, e-mail: l.piechowski@we.umg.edu.pl,
dr inż. Adam Muc, e-mail: a.muc@we.umg.edu.pl,
Uniwersytet Morski w Gdyni, Katedra Automatyki Okrętowej,
Wydział Elektryczny, ul. Morska 81÷87, 81-200 Gdynia

LITERATURA

- [1] Piechowski L., Symulator drgań łopatek wirnikowych turbin parowych w metodzie Tip-Timing, Rozprawa Doktorska Instytut Maszyn Przepływowych PAN, Gdańsk 2019r.,
- [2] Szczepanik R., Kudelski R., System of Measurement of Rotor Blade Amplitude of Flow Machinery, Polish patent: 157179, Air Force Institute of Technology, Warsaw, 1987
- [3] Rokicki E., Inductive Sensor to Dynamic Analysis of Rotor Blades of Jet Engine, Phd Thesis of Air Force Institute of Technology, Warsaw, 2012,
- [4] Tietze U., Schenk Ch., Gamm E., Electronics Circuits, Handbook for Design and Application 2nd edition, Springer 2007
- [5] Karta katalogowa czujnika reluktancyjnego firmy JAQUET,
- [6] Rządowski R., Kubitz L., Maziarz M., Troka P., Piechowski L., Szczepanik R., Tip-timing analysis of last stage steam turbine mistuned bladed disc during run-down, MATEC Web of Conferences 211, 03003, 2018,
- [7] Szczepanik R., Rokicki E., Rządowski R., Piechowski L., Tip-timing and tip-clearance for measuring rotor turbine blade vibrations, J. Vib. Eng. Technol 2 (5), 395-406, 2014,
- [8] Piechowski L., Rządowski R., Troka P., Piechowski P., Kubitz L., Tip-timing steam turbine rotor blade simulator, Journal of Vibration Engineering & Technologies 6, 317-323, 2018,
- [9] Piechowski L., Rządowski R., Troka P., Piechowski P., Szczepanik R., Rotor blade vibration simulator of steam turbine with aliasing frequencies up to 25 Hz, Transactions of the Institute of Fluid-Flow Machinery 2016,