

# WYBRANE PROBLEMY POMIARU DRGAŃ

ROBERT KOSTEK

## Streszczenie

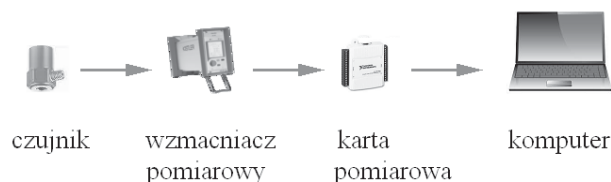
*W artykule tym przedstawiono przykład konfiguracji toru pomiarowego do pomiaru drgań oraz wyniki pomiarów. Wyniki pomiarów zostały zakłócone przez przemiennik częstotliwości, który służył do napędzania silnika prądu przemiennego. Zakłócenia miały znaczną wartość ponieważ, układ napędowy został niewłaściwie wykonany. Nie zastosowano skryнки falownika, filtrów oraz ekranowanych kabli. Ponadto tor pomiarowy został nieprawidłowo skonfigurowany. Przedstawione wyniki badań eksperymentalnych dobrze obrazują problem zakłóceń elektromagnetycznych emitowanych przez przemiennik częstotliwości.*

**Słowa kluczowe:** pomiar drgań, zakłócenia elektromagnetyczne, przemiennik częstotliwości

## 1. Wprowadzenie

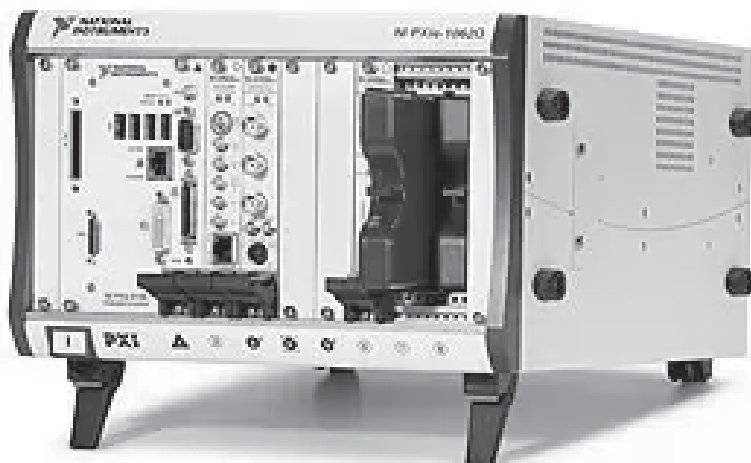
Większość pomiarów wielkości nieelektrycznych jest realizowana aparaturą, która przetwarza wielkości nieelektryczne na wielkości elektryczne. Na przykład pomiaru przyspieszeń dokonuje się czujnikami piezoelektrycznymi, indukcyjnymi, pojemnościowymi, oporowymi (tensometrycznymi) i optycznymi. Nie są to wszystkie rodzaje czujników stosowanych do pomiaru drgań, wymieniono tutaj tylko czujniki najczęściej stosowane dla pokazania różnorodności rozwiązań.

Czujnik jest częścią toru pomiarowego. Może on zostać podłączony do wzmacniacza pomiarowego (mostka pomiarowego), który na wyjściu daje analogowy sygnał napięciowy, rzadziej prądowy lub cyfrowy. W kolejnym etapie analogowy sygnał napięciowy jest zamieniany w karcie pomiarowej na napięciowy sygnał cyfrowy i przesyłany do komputera, gdzie następuje akwizycja danych na dysku. Przedstawiono tutaj klasyczny tor pomiarowy (rys. 1). Oczywiście można spotkać zintegrowane systemy pomiarowe, które zawierają wbudowane mostki pomiarowe, karty pomiarowe i komputer. Przykładem takiego rozwiązania jest na przykład PIX firmy National Instruments (rys. 2). Spotyka się także czujniki z wbudowaną elektroniką, które współpracują bezpośrednio z komputerem przez złącze USB. Nie zmienia to jednak zasady działania toru pomiarowego, w którym wielkość nieelektryczna na przykład przyspieszenie, jest zamieniana na sygnał napięciowy.



Rys. 1. Schemat przepływu informacji w klasycznym torze pomiarowym

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 2. System pomiarowy zawierający wzmacniacze pomiarowe, przetworniki analogowo cyfrowe, przetworniki cyfrowo analogowe, karty pomiarowe, karty sterujące oraz komputer

Źródło: [7].

W wielu stanowiskach badawczych steruje się prędkością obrotową silników elektrycznych. Parametr ten można łatwo zmienić stosując silniki elektryczne asynchroniczne i przemienniki częstotliwości (falownik). Rozwiązanie to jest tanie, a zarazem daje możliwość płynnej regulacji prędkości obrotowej w szerokim zakresie. Jednocześnie stosowane moce są znacznie większe niżeli w silnikach krokowych. Jednakże stosowanie falowników wprowadza poważne zakłócenia elektryczne, które mogą uniemożliwić właściwy pomiar.

W artykule tym przedstawiono wpływ zakłóceń elektrycznych generowanych przez przemiennik częstotliwości, na pomiar przyspieszeń.

## 2. Konfiguracja badanego stanowiska

Badany tor pomiarowy zawiera akcelerometry przemysłowe VIS-311A z wbudowanym przedwzmacniaczem (technologia ICP) i izolacją obwodu elektrycznego od obudowy (rys. 3), oraz kartę pomiarową NI USB-9162 NI9233 firmy National Instruments (rys. 4). Ta karta pomiarowa ma budowę modułową i składa się z dwóch części: wzmacniacza ładunku (wzmacniacza pomiarowego) oraz „ramki” z miejscem na jeden wzmacniacz. Parametry akcelerometrów są przedstawione w tabeli 1. Na podstawie przedstawionych danych można wnioskować że czujniki te są przystosowane do pomiaru drgań o znacznej amplitudzie ( $\pm 50$ [g]). Podczas gdy obserwowane maksymalne wartości przyspieszeń dla łożyska uszkodzonego wynoszą  $\pm 6$ [g], natomiast dla łożyska sprawnego zaledwie  $\pm 0,6$ [g]. Jak widać, zakres pomiarowy został dobrane niepoprawnie, ponieważ wielokrotnie przekracza on obserwowane wartości maksymalne. Skutkuje to tym, że analogowe sygnały napięciowe

są rzędu  $\pm 600$ [mV] lub  $\pm 60$ [mV], więc mogą zostać zakłócone przez pole elektromagnetyczne generowane przez przemiennik częstotliwości. Powinien zostać dobrany w tym przypadku czujnik o zakresie pomiarowym  $\pm 10$ [g], lub  $\pm 5$ [g] jeśli obniżona zostanie wartość pików przyspieszenia. Gdyby dobrano czujnik o zakresie pomiarowym  $\pm 10$ [g], wtedy napięcie sygnału wynosiłoby odpowiednio  $\pm 3\ 000$ [mV], lub  $\pm 300$ [mV]. Co spowodowałoby spadek poziomu zakłóceń związanych z pracą falownika. Jest to pierwsza metoda zmniejszenia zasumienia sygnału.

Tabela 1. Parametry czujnika VIS-311 A

Parametry czujnika	Wartość	Wielkość
Czułość	100	[mV/g]
Zakres pomiarowy	$\pm 50$	[g]
Zakres częstotliwości ( $\pm 3$ dB)	0,5–10 000	[Hz]
Częstotliwość rezonansowa	25 000	[Hz]
Rozdzielczość	3434	[ $\mu\text{m}/\text{s}^2$ ]
Nieliniowość	$\pm 1\%$	-
Czułość skośna	$\leq 7\%$	-
Maksymalny udar	49 050	[ $\text{m}/\text{s}^2$ ]
Zakres temperatur	-54 +121	[°C]
Napięcie zasilania	18 - 28	[V]
Prąd zasilania	2–20	[mA]
Impedancja wyjściowa	<150	[ $\Omega$ ]
Szum widmowy - 10 [Hz]	78,5	[( $\mu\text{m}/\text{s}^2$ )/ $\sqrt{\text{Hz}}$ ]
Szum widmowy - 100 [Hz]	49,1	[( $\mu\text{m}/\text{s}^2$ )/ $\sqrt{\text{Hz}}$ ]
Szum widmowy - 1 000 [Hz]	39,2	[( $\mu\text{m}/\text{s}^2$ )/ $\sqrt{\text{Hz}}$ ]
Wymiary	18 * 42,2	[mm]
Waga	51	[g]
Izolacja elektryczna części elektronicznej	100 000 000	[ $\Omega$ ]

Źródło: [13.]



Rys. 3. Czujnik pomiarowy VIS-311A

Źródło: [8].



*Rys. 4. Karta pomiarowa NI USB-9162 NI9233*

Źródło: [6].

Układ napędowy z kolei składa się z silnika – BESEL S.A.,  $P=250\text{W}$ ,  $n=2760\text{obr/min}$ , izolacja F, oraz falownika – LS Industrial Systems SV004iE5-1 (rys. 5). Jest pewna grupa silników elektrycznych przystosowana do współpracy z falownikami. Mają one specjalne łożyska toczne, które nie przewodzą prądu między pierścieniami. Są to łożyska ceramiczne, lub stalowe pokryte materiałem izolacyjnym. Ponadto izolacja elektryczna uzwojeń takich silników jest bardziej odporna na przebicie elektryczne. Posiadają one także wentylator napędzany odrębnym silnikiem. Wyżej wymieniony silnik nie jest silnikiem tego typu. Jest on więc narażony na szereg zjawisk pasożytniczych, redukujących czas eksploatacji. W takim przypadku może być obserwowany ma przykład prąd wałowy lub prebicie izolacji elektrycznej.

Ponadto falownik powinien być umieszczony w uziemionej skrzynce metalowej. Powinny być umieszczone filtry przed jak i za falownikiem. Natomiast pomiędzy falownikiem a silnikiem powinny zostać zastosowane specjalne kable z ekranami. Rozwiązania te stosuje się po to, aby uniknąć lub ograniczyć propagację zakłóceń generowanych przez falownik. Produkowane są falowniki, które są fabrycznie ekranowane i mają wbudowane filtry. Działania te prowadzą w efekcie do odizolowania falownika od otoczenia. Żadne z wyżej wymienionych zaleceń nie zostało spełnione, w wyniku czego napięcia obserwowane na korpusach czujników były rzędu  $\pm 15\ 000\text{[mV]}$ . Pomiaru napięcia dokonano oscyloskopem (rys. 6). W internecie można znaleźć wiele opisów problemów związanych z wprowadzaniem zakłóceń elektromagnetycznych przez przemienniki częstotliwości, jeśli nie zostały one poprawnie zabudowane. Obserwowane są nawet problemy z poprawną pracą urządzeń cyfrowych, ponieważ są one zakłócanie przez falownik. [1–5, 9–11].

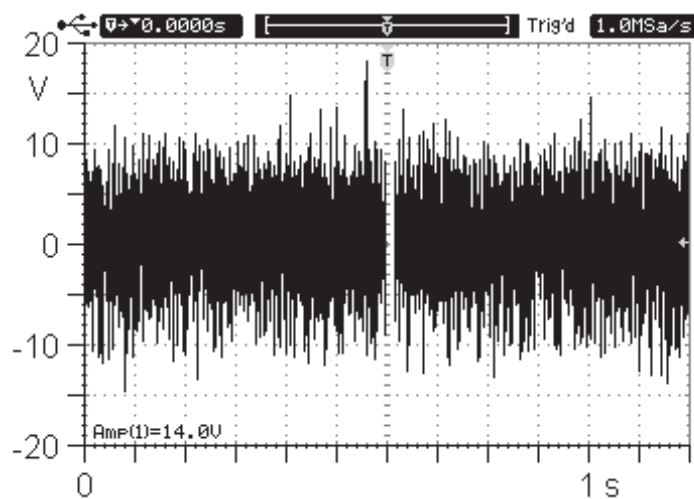
Falownik składa się z prostownika, który prąd zmienny pobierany z sieci elektrycznej zamienia na prąd stały. Następnie prąd stały jest zamieniany na prąd zmienny. Tranzystory mocy gwałtownie podają wysokie napięcie z prostownika na odbiornik, a następnie gwałtownie odcinają to napięcie. Czas przełączania tranzystorów jest ważnym parametrem. Im krótszy czas tym mniejsze są straty energii. Jednakże gwałtowne zmiany napięcia powodują emisję zakłóceń elektromagnetycznych i pojawienie się wysokich częstotliwości na widmie napięcia. Z kolei prąd zmienny o wysokiej częstotliwości przepływa przez izolacje, która działa jak kondensator. Podobnie pole magnetyczne

powoduje indukowanie prądów wirowych. Ten opis pokazuje mechanizmy propagacji zakłóceń elektromagnetycznych.



*Rys. 5. Przemiennik częstotliwości*

Źródło: [12].



*Rys. 6. Przebieg czasowy napięcia zarejestrowany na korpusie czujnika przyspieszeń*

Źródło: opracowanie własne.

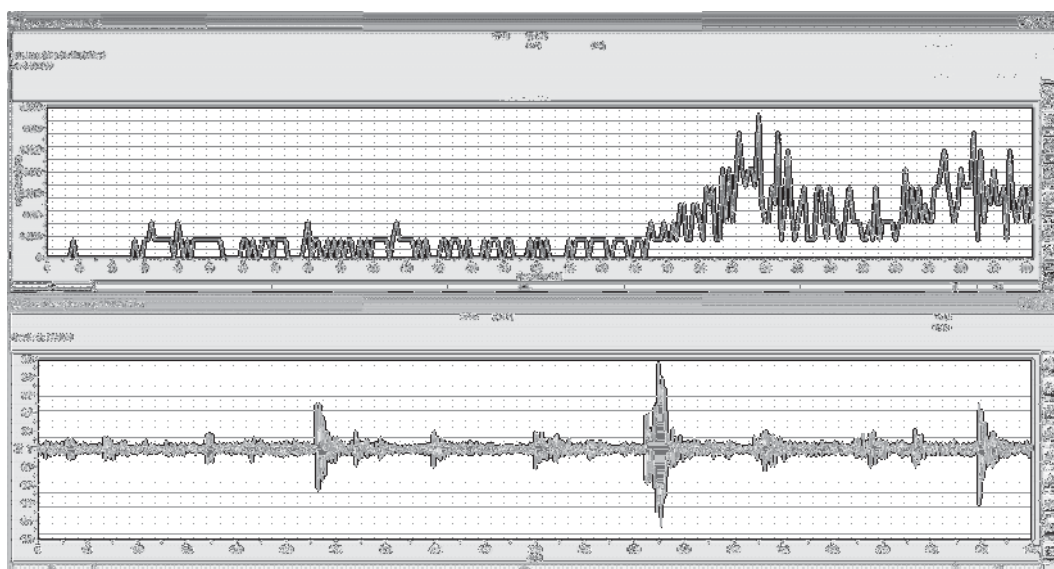
### 3. Zmierzone przebiegi czasowe i widma

Przeprowadzono badania eksperymentalne w celu zmierzenia i identyfikacji zakłóceń. Częstotliwość falownika ustawiono na 10[Hz]. Zarejestrowano następnie przebiegi czasowe przyśpieszeń i dokonano transformaty Fouriera. Wyniki dla sygnału bez wyraźnych objawów zakłócenia przedstawiono na rys. 7, podczas gdy wyniki dla sygnału silnie zakłóconego zaprezentowano na rys. 8.

Na widmie sygnału niezakłóconego (rys. 7) częstotliwości będące wielokrotnością 10[Hz] i 50[Hz] nie są dominujące. Wyraźnie widać wzrost amplitudy składowych harmonicznych o częstotliwości powyżej 190[Hz], które wiążą się z dynamiką łożyska. Drgania tego łożyska tocznego są wzbudzone przez impulsy wywołane defektami bieżni i elementów tocznych. Następnie amplituda drgań ulega zmniejszeniu. Zarejestrowane przebiegi czasowe można uznać za wiarygodne.

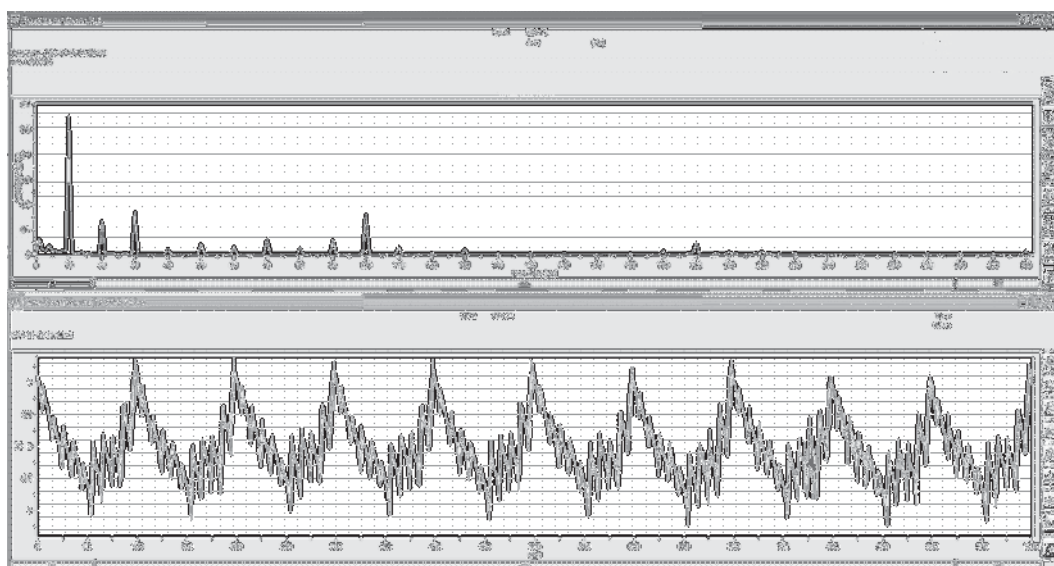
Natomiast, zupełnie inaczej wygląda widmo dla przebiegu czasowego przyśpieszenia, który jest silnie zakłócony. Dominują amplitudy składowych związanych z pracą przemiennika częstotliwości (rys. 8). Podobnie na przebiegu czasowym przyśpieszenia dominuje składowa o częstotliwości 10[Hz]. "Amplituda drgań" wynosi teraz 1.4[g] co tak naprawdę odpowiada amplitudzie zakłóceń. Wartość tych zakłóceń można oszacować na 140[mV]. Z powyższego wynika, że izolacja elektryczna czujnika ograniczyła wpływ zakłóceń. Mimo wszystko taki sygnał należy uznać za niedopuszczalny. W takim przypadku konieczne są niestandardowe działania, połączone z przebudową układu napędowego lub toru pomiarowego. Można na przykład zastosować optyczne czujniki przyśpieszeń, które nie są zakłócone przez pole elektromagnetyczne.

Dla lepszego zobrazowania zakłóceń jakie wprowadza falownik do toru pomiarowego przedstawiono kilka dodatkowych rysunków. Częstotliwość falownika ustawiono na 10[Hz], tak samo jak poprzednio, ale zaobserwowano dodatkowe efekty. Zaobserwowano szum o częstotliwości poniżej 10[Hz] (rys. 9). W efekcie błąd zera („pływające zero”) jest obserwowany. Tego typu błąd nie jest często obserwowany w torze pomiarowym zawierającym czujniki piezoelektryczne. Częściej jest on obserwowany dla czujników oporowych. Eliminacja takiego szumu jest trudna, ponieważ przechodzi on przez filtry dolnoprzepustowe, dlatego potrzebne są zaawansowane metody filtracji. Kolejnym efektem który można zaobserwować są nagłe zmiany wartości przyśpieszenia (rys. 10). W tym przypadku wartość średnia przyśpieszenia zmienia swoją wartość dla czasu  $t=625$ [ms]. Ta zmiana nie ma nic wspólnego z drganiami stanowiska. Podobne zjawiska obserwowano dla ustawienia falownika 0,5[Hz] (rys. 11). W tym przypadku amplituda drgań zmienia się gwałtownie, oraz wartość średnia przyśpieszenia ulega nagłym zmianom. Podobnie jak poprzednio obserwowane przebiegi czasowe przyśpieszeń nie są związane z drganiami stanowiska. Tego typu zjawiska powodują że rejestrowane sygnały są nieprzydatne w diagnostyce maszyn. Odszumianie takich sygnałów jest niemożliwe, z uwagi na szeroki zakres częstotliwości zakłóceń oraz znaczną ich wartość.



*Rys. 7. Widmo i przebieg czasowy przyspieszenia bez wyraźnych objawów zakłócenia*

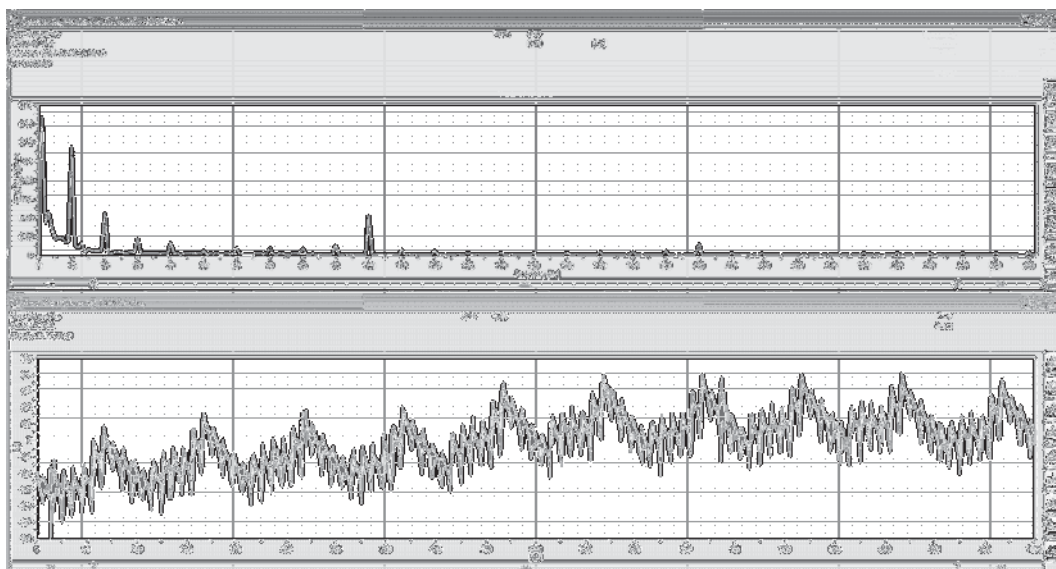
Źródło: opracowanie własne.



*Rys. 8. Widmo i przebieg czasowy przyspieszenia silnie zakłóconego przez przemiennik częstotliwości*

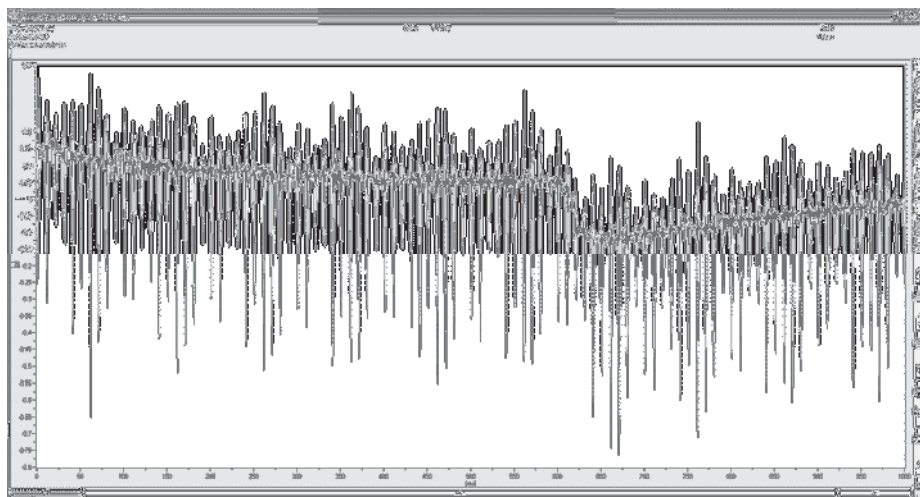
Źródło: opracowanie własne.





Rys. 9. Widmo i przebieg czasowy przyspieszenia dla ustawienia falownika 10 [Hz], widoczny jest błąd zera

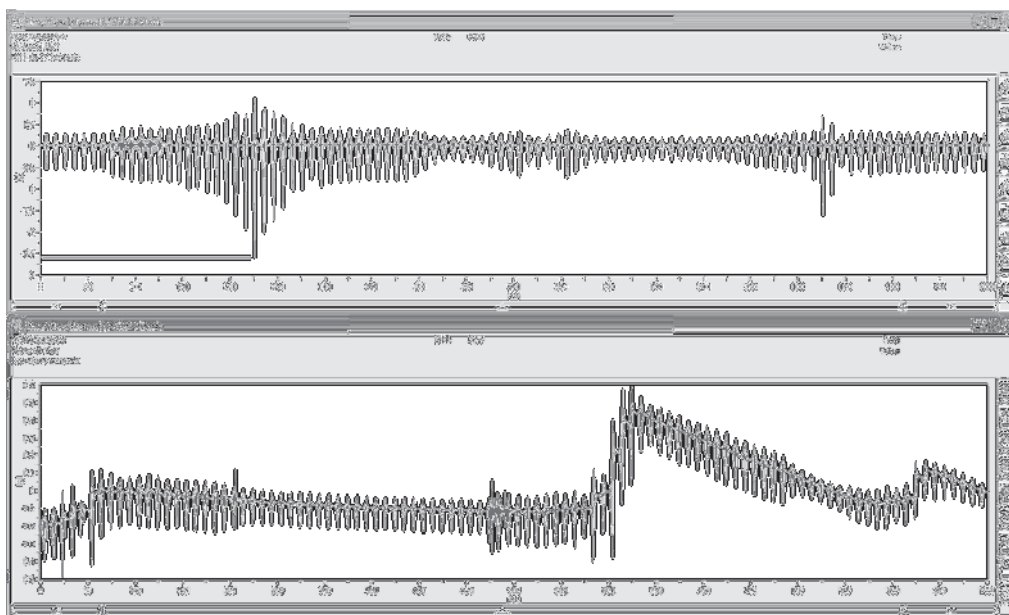
Źródło: opracowanie własne.



Rys. 10. Przebieg czasowy przyspieszenia dla ustawienia falownika 10 [Hz], widoczna jest nagła zmiana wartości średniej przyspieszenia oraz błąd zera

Źródło: opracowanie własne.





Rys. 11. Przebiegi czasowe przyspieszenia dla ustawienia falownika 0,5[Hz],  
 widoczne są zmiany amplitudy drgań oraz błąd zera

Źródło: opracowanie własne.

#### 4. Podsumowanie

Konfiguracja toru pomiarowego jest czynnikiem kluczowym. Wpływa ona na wrażliwość toru pomiarowego na zakłócenia. Omówiono tutaj tylko fragment tego zagadnienia. Ponadto stosowanie przemienników częstotliwości, pomimo niewątpliwych zalet, wiąże się z ryzykiem, że rejestrowane przebiegi czasowe zostaną zakłócone przez pole elektromagnetyczne i prądy generowane przez falownik jak i silnik elektryczny.

#### Bibliografia

1. Guziński J., Krzeziński Z.: *Filtr wyjściowy falownika napięcia*, Napędy i sterowanie Nr 4/2005.
2. Oh W.: *Zapobieganie elektroerozyjnym uszkodzeniom łożysk w silnikach prądu przemiennego zasilanych z falowników*, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 85/2010.
3. Strączyński M., Gizicki A.: *Regulacja parametrów pracy układów pompowych pomp głębinowych poprzez zmianę prędkości obrotowej silników głębinowych. Część 2*, Forum eksploatatora listopad/grudzień 2010.
4. Trajdos M., Pastuszka R.: *Jakie kable lubią falowniki*, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 71/2005.

5. Zientek P.: *Wpływ parametrów wyjściowych falowników pwm i kabla zasilającego na zjawiska pasożytnicze w silnikach indukcyjnych*, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 71/2005.
6. <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/en/nid/204481> dostęp – 2014.05.11.
7. <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/en/nid/206303> dostęp – 2014.05.11.
8. [http://www.ec-systems.pl/tl\\_files/pliki/czujniki/VIS-311A/VIS-311A.jpg](http://www.ec-systems.pl/tl_files/pliki/czujniki/VIS-311A/VIS-311A.jpg) dostęp – 2014.05.11.
9. [http://www.elektroda.pl/rtvforum/find.php?search\\_keywords\\_prev=falownik&search\\_forums=9%2C359%2C19&search\\_cat=12%2C29%2C1%2C33%2C19%2C10%2C30%2C23%2C24%2C18%2C4%2C28%2C8&search\\_keywords=falownik+zak%B3%F3cienia](http://www.elektroda.pl/rtvforum/find.php?search_keywords_prev=falownik&search_forums=9%2C359%2C19&search_cat=12%2C29%2C1%2C33%2C19%2C10%2C30%2C23%2C24%2C18%2C4%2C28%2C8&search_keywords=falownik+zak%B3%F3cienia) dostęp – 2014.05.11.
10. <http://www.elektro-trading.com.pl/filtry.htm> dostęp – 2014.05.11.
11. <http://www.elhand.pl/4/14/> dostęp – 2014.05.11.
12. [http://www.sklep.el-helu.com/view,1020,38,159,lg\\_sv004ie5\\_1c\\_0\\_4kw\\_230v.html](http://www.sklep.el-helu.com/view,1020,38,159,lg_sv004ie5_1c_0_4kw_230v.html) dostęp – 2014.05.11.
13. <http://www.vibx.energocontrol.pl/index.php?m=Products&a=Productinfo&pid=38&lang=pl> dostęp – 2014.05.11.

## SELECTED ISSUES OF VIBRATION MEASUREMENTS

### Summary

*In this article issues associated with vibration measurement are studied. These problems correspond to selection of transducers, measuring equipment and driving systems. Measured time histories contains some noise, because a variable-frequency drive (VFD) and an electric motor are used. These data are noisy, because driving system and measuring system were not well designed and performed. Presented experimental results well illustrate this issue.*

**Keywords:** vibration measurements, electromagnetic noise, variable-frequency drive

Robert Kostek  
Faculty of Mechanical Engineering  
University of Technology and Life Sciences in Bydgoszcz  
Al. Prof. S.Kaliskiego 7, 85-789 Bydgoszcz, budynek 2.3  
e-mail: robertkostek@o2.pl