

Stanowisko laboratoryjne do automatycznego wyznaczania charakterystyk dynamicznych czujników drgań

dr inż. Wacław GAWĘDZKI

Ukończył studia na kierunku Elektrotechnika w Akademii Górniczo-Hutniczej w roku 1979 w zakresie automatyki i metrologii elektrycznej. W roku 1988 uzyskał stopień doktora nauk technicznych w zakresie elektrotechniki. Zajmuje się zagadnieniami związanymi z pomiarami wielkości nieelektrycznych, właściwościami dynamicznymi aparatury pomiarowej, problematyką kalibracji i auto-kalibracji torów pomiarowych oraz kompresji sygnałów pomiarowych.



Adres e-mail: waga@agh.edu.pl

mgr inż. Andrzej NOWAK

Ukończył studia na kierunku Elektrotechnika w Akademii Górniczo-Hutniczej w roku 2006 w zakresie automatyki i metrologii elektrycznej. Zajmuje się zagadnieniami związanymi z informatycznymi aplikacjami projektowymi: LabView, Microcap, Matlab Simulink, Electronic Workbench, HTML, Asembler, Lon Works, Intouch. Aktualnie jest zainteresowany tematyką związaną z realizacją projektu Lilly grupa Glo/LillyNet-IncidentMgmt, która zajmuje się administracją ticketów związanych z LillyNet'em.



Adres e-mail: nowag@poczta.fm

mgr inż. Piotr MURAWSKI

Ukończył studia na kierunku Elektrotechnika w Akademii Górniczo-Hutniczej w roku 2006 w zakresie automatyki i metrologii elektrycznej. Zajmuje się zagadnieniami związanymi z informatycznymi aplikacjami projektowymi: LabView, Microcap, Matlab Simulink, Electronic Workbench, Agilent Vee, Lon Works, iFIX, PHP, SQL, Intouch, a także administrowaniem, modernizacją i rozbudową internetowych sieci komputerowych oraz serwisowaniem i konfiguracją komputerów.



Adres e-mail: mur007@interia.pl

Streszczenie

W artykule omówiono stanowisko laboratoryjne do automatycznego wyznaczania charakterystyk dynamicznych czujników drgań, które może być również wykorzystane dla celów dydaktycznych. Opracowano algorytm automatyzacji pomiaru i praktycznie zrealizowano go w środowisku LabView. Podstawowym zadaniem algorytmu sterującego jest dobór nastaw generatora sygnału w taki sposób, aby w jak najkrótszym czasie doprowadzić drgania głowicy stołu wibracyjnego do zadanej wartości przyspieszenia lub przemieszczenia. Po jej osiągnięciu następuje odczyt wartości amplitud sygnałów wyjściowych z czujników: wzorcowego i badanego dla zadanej częstotliwości. Procedura jest automatycznie powtarzana dla kolejnej zadanej wartości częstotliwości i przyspieszenia bądź przemieszczenia.

Słowa kluczowe: akcelerometr, wibrometr, charakterystyki częstotliwościowe, auto-wzorcowanie

A laboratory stand for automatic evaluation of vibration sensors dynamic characteristics

Abstract

The paper presents a laboratory stand meant for automatic evaluation of vibration sensors dynamic characteristics, which also may be used for teaching purposes. An algorithm of measurement automation has been elaborated and practically realized in the LabView environment. The basic task of the controlling algorithm is the choice of the signal generator settings to assure, that the head of vibrating table achieve assigned values of acceleration or displacement. After that a readings are made of output signals for the sensors: standard and examined for the assigned frequency. The procedure is automatically repeated for subsequent values of acceleration or displacement.

Keywords: accelerometer, vibrometer, frequency characteristics, self-calibration

1. Wprowadzenie

Stosowane w przemyśle czujniki do pomiarów parametrów drgań wymagają okresowej kontroli. Obejmuje ona sprawdzenie poprawności działania, wyznaczenie czułości czujników oraz ich charakterystyk dynamicznych – najczęściej wystarczające jest wyznaczenie charakterystyk amplitudowo-częstotliwościowych. Procedura pomiaru charakterystyk częstotliwościowych jest szczególnie pracochłonna i uciążliwa, wymaga wielokrotnego pomiaru sygnałów: wejściowego (mierzonego za pomocą czujnika wzorcowego) i wyjściowego czujnika badanego dla sinusoidalnych drgań o częstotliwościach z zakresu pomiarowego czujników. W laboratorium Pomiarów Wielkości Nielektrycznych Katedry Metrologii AGH opracowane zostało stanowisko do automatycznego wyznaczania charakterystyk dynamicznych czujników drgań. Oprócz zastosowań kalibracyjnych stanowisko może być również wykorzystywane dla celów dydaktycznych [4].

W artykule przedstawiono opracowany algorytm pomiarowo-sterujący i jego praktyczną realizację w środowisku LabView na stanowisku laboratoryjnym służącym do określania parametrów czujników drgań oraz wyznaczania między innymi charakterystyk częstotliwościowych akceleratorów, jak również czujników przemieszczenia i prędkości.

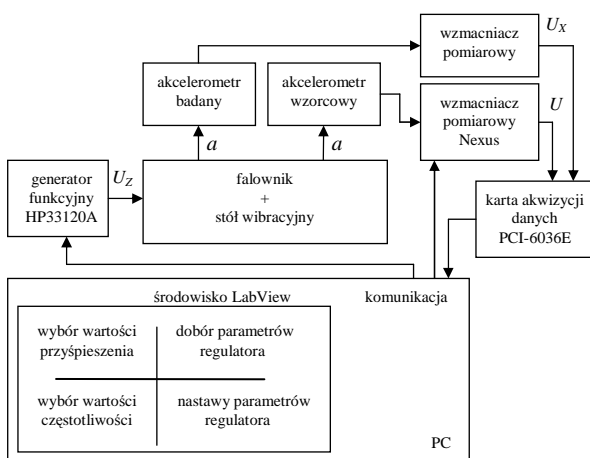
2. Opis stanowiska laboratoryjnego

W artykule przedstawiono stanowisko i omówiono algorytm do wyznaczania charakterystyk dynamicznych akceleratorów, co upraszcza opis, a nie ogranicza w żaden sposób jego uniwersalności i możliwości zastosowania dla innego typu czujników drgań (czujniki przemieszczenia i prędkości), dla których sposób postępowania będzie podobny przy odpowiedniej definicji sygnału mierzonego. W skład stanowiska (rys.1) wchodzi: stół wibracyjny sterowany falownikiem, generator funkcyjny, wzmacniacz pomiarowy Nexus współpracujący z wzorcowym czujnikiem przyspieszenia oraz akcelerometr badany i dostosowany do niego wzmacniacz pomiarowy. Stanowisko uzupełnia komputer PC z kartą pomiarową i oprogramowaniem LabView, które umożliwiają automatyzację procesu wyznaczania charakterystyk akceleratorów. Głowica stołu wibracyjnego wprawiana jest w drgania sinusoidalne o zadanej częstotliwości za pomocą falownika sterowanego przez generator [1]. Na głowicy stołu umieszczony jest badany czujnik współpracujący ze wzmacniaczem, który przetwarza przyspieszenie głowicy stołu a na odpowiadający mu napięciowy sygnał wyjściowy U_x , oraz czujnik wzorcowy współpracujący ze wzmacniaczem ładunkowym, na wyjściu którego otrzymujemy napięcie U proporcjonalne do przyspieszenia a głowicy stołu. Obydwa

sygnały napięciowe rejestrowane są w komputerze za pomocą karty pomiarowej.

Podstawowym elementem stanowiska pomiarowego, który umożliwia pobudzenie do drgań badanych czujników, jest stół wibracyjny. Ruchoma głowica stołu umożliwia zadawanie drgań i wibracji o różnych charakterystykach, dzięki czemu można go wykorzystać do kalibrowania urządzeń pomiarowych, wykonywania testów obciążeniowych elementów mechanicznych i konstrukcyjnych, badania rezonansów w urządzeniach oraz wyznaczania ich parametrów dynamicznych.

Stół napędzany jest elektrodynamicznie, ruch głowicy wywołuje sprzężona z nią mechanicznie powietrzna cewka, znajdująca się w polu magnetycznym pochodzącym od prądu stałego, drgająca w rytm przepływającego prądu zmiennego. Źródłem prądu przemiennego podanego na cewkę jest falownik sterowany przez generator funkcyjny. Ze względu na ograniczenia konstrukcyjne głowica stosowanego stołu wibracyjnego może przemieszczać się w zakresie $\pm 8\text{mm}$, a zakres możliwych do uzyskania częstotliwości pracy waha się w zakresie od 0 Hz do 1000 Hz.



Rys. 1. Schemat blokowy stanowiska laboratoryjnego [4].
Fig. 1. Block diagram of measuring stand.

Tor do wzorcowego pomiaru przyspieszenia tworzy akcelerometr piezoelektryczny typu Delta Shear o symbolu 4370 firmy Brüel & Kjaer, współpracujący ze wzmacniaczem ładunkowym typu Nexus również firmy B&K, którego napięciowy sygnał wyjściowy podawany jest na kartę pomiarową. Częstotliwościowe pasmo pracy czujnika zawiera się w zakresie 0.1Hz do 4.8kHz, przy czym w zależności od nastawionych wartości parametrów filtra wzmacniacza może ono być zachowane, bądź ograniczone w zależności od potrzeb (np. w celu wyeliminowania zakłóceń). Wszystkie wartości parametrów i funkcje wzmacniacza mogą być ustawiane ręcznie za pomocą klawiatury płyty czołowej bądź zdalnie poprzez interfejs szeregowy RS232C.

Stanowisko laboratoryjne konstruowane było pod kątem kalibracji sejsmometrycznych czujników drgań, które w praktyce najczęściej stosowane są w zakresie częstotliwości drgań od 0,5Hz do 100Hz, przy czym zakres częstotliwościowy badanych czujników przeważnie nie przekracza 1000Hz. Zastosowany wzorcowy tor pomiaru przyspieszenia jest w pełni wystarczający dla tego typu czujników. W przypadku konieczności wyznaczenia charakterystyk w szerszym zakresie częstotliwości można zastosować aparaturę wzorcową o odpowiednio dostosowanych parametrach, co umożliwi wykorzystanie opracowanego stanowiska oraz algorytmu pomiarowo-sterującego.

Do sterowania stołu wibracyjnego zastosowano na stanowisku laboratoryjnym uniwersalny generator funkcyjny typu HP33120A firmy Hewlett Packard. Umożliwia on zadawanie pięciu podstawowych przebiegów, a także ma możliwość generowania przebiegu arbitralnego o dowolnym kształcie zdefiniowanym przez użytkownika. Zadawanie parametrów generatora może być realizowane poprzez jego klawiaturę lub interfejs szeregowy

RS232C, który został wykorzystany na stanowisku [3]. Generator zasila cewkę wzbudnika drgań poprzez falownik, którego zadaniem jest przetworzenie napięciowego sygnału generatora na niskonapięciowy (napięcie rzędu kilku woltów) sygnał silnoprądowy o natężeniu rzędu kilkudziesięciu amperów. Zapewnia to uzyskanie dostatecznie dużej wartości siły elektrodynamicznej działającej na głowicę wzbudnika drgań.

Do rejestracji sygnałów zastosowano standardową kartę pomiarową typu PCI-6036E firmy National Instruments, a do jej obsługi oraz do implementacji algorytmu pomiarowo-sterującego procedurą kalibracji zastosowano oprogramowanie LabView.

3. Identyfikacja elementów układu sterowania

Opracowanie algorytmu pomiarowo-sterującego wymaga przeprowadzenia na wstępie identyfikacji elementów układu sterowania. Podstawowym elementem toru pomiarowo-sterującego wymagającym identyfikacji jest układ złożony z falownika i stołu wibracyjnego rys.1. Dla układu tego należy określić transmitancję, zdefiniowaną jako stosunek transformaty operatorowej przyspieszenia a głowicy stołu wibracyjnego do transformaty operatorowej napięcia wejściowego U_z falownika podanego z generatora funkcyjnego. Określenie takiej funkcji przetwarzania pozwala znaleźć odpowiedź na pytanie, jaką wartość amplitudy sinusoidalnego napięcia zasilającego falownik należy zadać, aby uzyskać założoną wartość amplitudy przyspieszenia głowicy stołu wibracyjnego przy ustalonej częstotliwości sygnału. W procesie identyfikacji uwzględniane są automatycznie właściwości dynamiczne wzorcowego toru pomiaru przyspieszenia, za pomocą którego określana jest wartość przyspieszenia głowicy stołu. Identyfikacja przeprowadzona została bowiem na podstawie zarejestrowanego napięciowego sygnału wyjściowego U ze wzmacniacza Nexus otrzymanego dla pobudzenia falownika napięciowym sygnałem skokowym U_z . Wartość przyspieszenia głowicy stołu wyznaczono przy uwzględnieniu wzmocnienia K_w wzmacniacza Nexus (ustawianego w procesie programowania parametrów wzmacniacza) na podstawie zależności:

$$a(t) = \frac{U(t)}{K_w} \quad (1)$$

Model matematyczny układu stół wibracyjny - falownik można przedstawić w postaci równań różniczkowych opisujących jego część mechaniczną oraz elektryczną [1]:

$$m \cdot \frac{d^2 x(t)}{dt^2} = -b \cdot \frac{dx(t)}{dt} - k \cdot x(t) + F(t) \quad (2)$$

$$L \cdot \frac{di(t)}{dt} = -R \cdot i(t) - k_e \cdot \frac{dx(t)}{dt} + U_z(t) \quad (3)$$

gdzie: m , b oraz k oznaczają odpowiednio masę części ruchomej, stałą tłumienia oraz stałą sprężystości mechanicznego układu głowicy stołu wibracyjnego, a siła elektrodynamiczna $F(t)$ powodująca wychylenie głowicy stołu o $x(t)$ jest proporcjonalna do prądu $i(t)$ w cewce ruchomej:

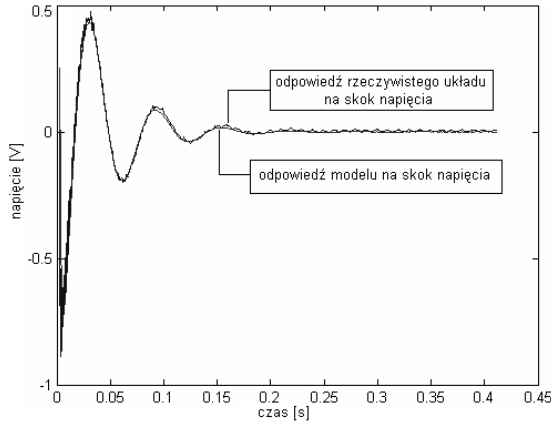
$$F(t) = k_m \cdot i(t) \quad (4)$$

L , R oraz k_e oznaczają odpowiednio indukcyjność, rezystancję cewki ruchomej oraz współczynnik proporcjonalności umożliwiający określanie wartości siły elektromotorycznej indukowanej w cewce zależnie od prędkości ruchu sprzężonej z głowicą cewki.

Po rozwiązaniu układu równań (2) i (3) w dziedzinie operatorowej i wyznaczeniu wartości poszukiwanych współczynników modelu na podstawie zarejestrowanej odpowiedzi skokowej – rys.2 otrzymano następujący model matematyczny układu falownik - stół wibracyjny [4]:

$$G(s) = \frac{a(s)}{U_z(s)} = \frac{-0.224 \cdot s^2}{0.00045 \cdot s^3 + 0.473 \cdot s^2 + 28.42 \cdot s + 4931.3} \quad (5)$$

Porównanie napięciowej odpowiedzi U rzeczywistego układu i modelu na skok napięcia U_z przedstawiono na rys.2. [4]. Przedstawione wykresy potwierdzają poprawność przeprowadzonej identyfikacji, a dokładność wyznaczenia współczynników modelu jest w pełni wystarczająca z punktu widzenia sterowania układem wzbudzenia drgań.



Rys. 2. Napięciowe odpowiedzi rzeczywistego układu i modelu na skok napięcia U_z
Fig. 2. Voltage responses of real and model systems for voltage step U_z

Układ wzbudnika drgań ma pewne ograniczenia dotyczące wartości zadawanych przyspieszeń przy danej częstotliwości, jest to bardzo istotne, gdyż zadanie zbyt dużych przyspieszeń może doprowadzić do uszkodzenia stołu. Ograniczenia te wynikają z maksymalnego możliwego wychylenia głowicy stołu oraz z maksymalnego napięcia, jakie można zadać na falownik zasilający stół wibracyjny. Ograniczenie dla stołu wibracyjnego wynikające z maksymalnego wychylenia głowicy stołu, które wynosi 8 mm, dla odpowiednich częstotliwości sinusoidalnego sygnału zasilającego wyliczamy z zależności:

$$a_{\max 1} = 0.008 \cdot (2\pi f)^2 \quad (6)$$

maksymalne przyspieszenie, jakie możemy zadać nie przekraczając maksymalnej możliwej wartości napięcia na falowniku:

$$a_{\max 2} = U_{Z\max} \cdot |G(j\omega)| \quad (7)$$

gdzie: $|G(j\omega)|$ jest modułem transmitancji modelu (5), a $U_{Z\max}$ jest maksymalnym napięciem, jakie można podać na wejście falownika (w zastosowanym falowniku $U_{Z\max} = 10V$). Graniczna wartość zadawanego przyspieszenia będzie zatem wynosiła:

$$a_{\max} = \min(a_{\max 1}, a_{\max 2}) \quad (8)$$

4. Projekt układu sterowania

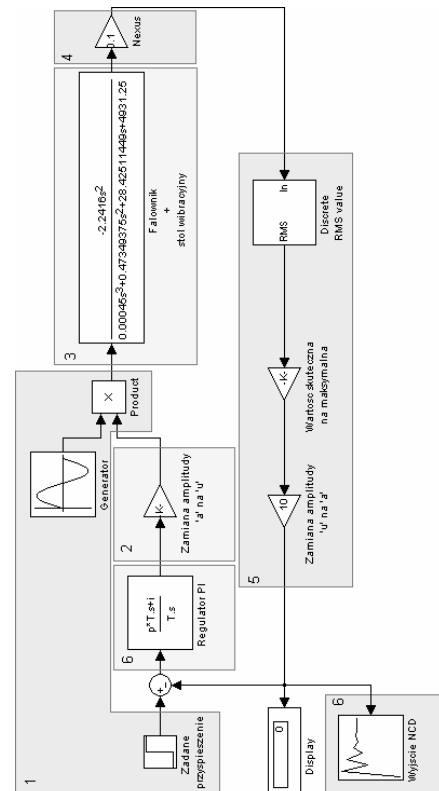
Celem działania algorytmu sterującego jest dobór nastaw generatora sygnału (amplitudy napięcia i częstotliwości sygnału sinusoidalnego) w taki sposób, aby w jak najkrótszym czasie doprowadzić drgania głowicy stołu wibracyjnego do zadanej wartości przyspieszenia bez nadmiernego przeregulowania. Po jej osiągnięciu następuje odczyt wartości amplitud sygnałów wyjściowych z czujników: wzorcowego i badanego dla zadanej częstotliwości. Procedura jest automatycznie powtarzana dla kolejnej zadanej wartości częstotliwości i przyspieszenia.

Na rys. 3. przedstawiono schemat blokowy układu sterowania do automatycznego wyznaczania charakterystyk amplitudowo-częstotliwościowych czujników drgań zaimplementowany w środowisku Matlab & Simulink. Blok nr 1 na rys.3. ma za zadanie generować sygnał sinusoidalny o regulowanej wartości amplitudy i częstotliwości. Model generatora wykonany został jako iloczyn sygnału sinusoidalnego (gdzie wybierana jest częstotliwość f i ustawiona na stałe amplituda 1V) oraz sygnału skoku

jednostkowego, który steruje wartością amplitudy sygnału poprzez regulator PI (blok nr 6). Przeliczenie wartości przyspieszenia na wartość napięcia odbywa się w bloku nr 2, przy czym wartość wzmocnienia K w tym bloku musi uwzględniać właściwości dynamiczne układu falownik - stół wibracyjny (5) zależne od częstotliwości f sygnału i wynosi:

$$K = 1 / |G(j2\pi f)| \quad (9)$$

W bloku nr 3 realizowana jest transmitancja układu falownik - stół wibracyjny (5) pomniejszona K_W razy (1), gdyż wzmocnienie K_W wzmacniacza Nexus przeniesione zostało do oddzielnego bloku nr 4 (w rozpatrywanej konfiguracji $K_W=0.1V/m/s^2$). Umożliwia to łatwe uwzględnianie ewentualnej zmiany zakresu wzorcowego toru pomiaru przyspieszenia. W efekcie uzyskujemy na wyjściu wzmacniacza Nexus sygnał napięciowy proporcjonalny do przyspieszenia głowicy stołu wibracyjnego.



Rys. 3. Schemat blokowy układu sterowania w środowisku Matlab&Simulink.
Fig. 3. Block diagram of control system in the Matlab/Simulink environment.

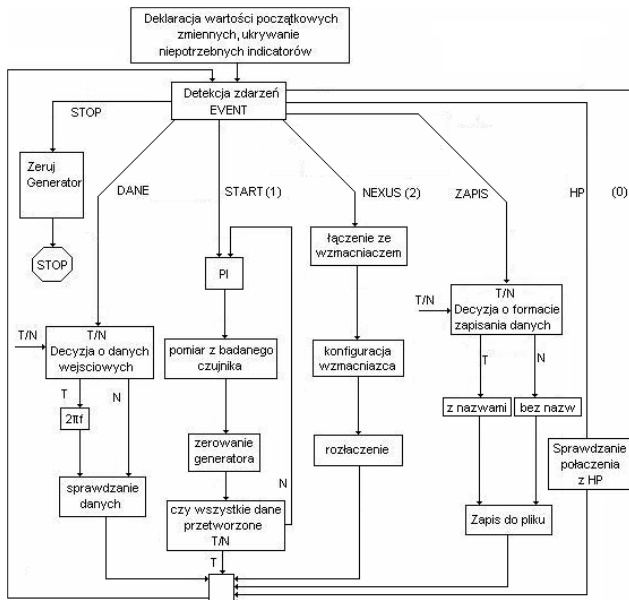
W układzie zrealizowane jest ujemne sprzężenie zwrotne, w wyniku czego w węzle sumacyjnym zadana wartość amplitudy przyspieszenia porównywana jest ze zmierzoną wartością amplitudy przyspieszenia, a sygnał uchybu regulacji steruje układem falownik – stół wibracyjny poprzez regulator PI. W bloku nr 5 wyznaczana jest wartość amplitudy przyspieszenia na podstawie napięciowego sygnału wyjściowego ze wzmacniacza Nexus, przy założeniu, że sygnał ma charakter sinusoidalny (wyznaczana jest wartość skuteczna sygnału napięciowego, mnożona przez $\sqrt{2}$ i dzielona przez K_W zgodnie z (1)).

W rzeczywistym układzie regulacji regulator PI zastąpiony został regulatorem dyskretnym. Wynika to z faktu, że w rzeczywistym układzie potrzebny jest czas na ustalanie się wartości napięć, wyznaczenie wartości skutecznej sygnału sinusoidalnego, lub chociażby na komunikację z urządzeniami. Dobór parametrów dyskretnego regulatora jest możliwy dzięki blokowi NCD Output wchodzącemu w skład Simulinka. Na podstawie modelu układu pomiarowo-sterującego wyznaczone zostały parametry regulatora dla każdej częstotliwości sygnału. Przebadano także poprawność funkcjonowania algorytmu.

5. Implementacja algorytmu pomiarowo-sterującego w środowisku LabView

Na podstawie projektu układu sterowania wykonanego w środowisku Matlab & Simulink opracowano algorytm pomiarowo-sterujący w środowisku LabView. Na rys. 4 przedstawiono uproszczony schemat algorytmu sterującego [4].

Program zbudowany jest z dwóch równolegle pracujących pętli while, w pierwszej z nich znajduje się struktura detekcji zdarzeń *EVENT*, przez co jest to pętla sterująca, większość zdarzeń w niej zawartych jest niezależna od drugiej pętli, z wyjątkiem zdarzenia dynamicznego *user event*, które wywołane spod pętli drugiej powoduje zatrzymanie pracy programu, zdarzenie to jest bardzo istotne, gdyż umożliwia szybkie „wyzeroowanie” generatora i wyłączenie programu, dzięki czemu możemy zapobiec uszkodzeniu elementu sterowanego. W drugiej pętli znajduje się struktura *switch*, która w zależności od podanej zmiennej sterowanej przez zdarzenia (*eventy*) pierwszej pętli, wywołuje uruchomienie procesu sterowania (1), włącza ustawiania wzmacniacza Nexus (2), bądź nie robi nic (0).



Rys. 4. Uproszczony schemat blokowy algorytmu sterującego [4].
Fig. 4. Simplified block diagram of controlling algorithm.

Kolejność przebiegu kroków algorytmu sterowania:

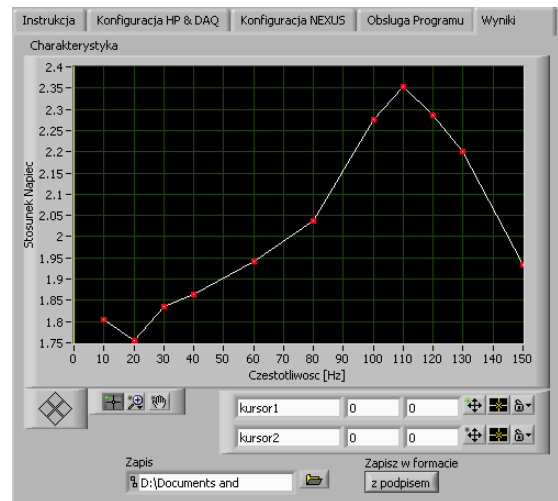
1. Pętla *for* dzięki opcji *indexing* wraz z każdym kolejnym wykonaniem cyklu pobiera kolejne elementy z tablicy danych, tablice te o nazwie „częstotliwość” i „przyspieszenie unormowane” tworzone są w wydarzeniu „Sprawdzenie Danych”, przyjmowane z deklaracji domyślnych lub z poprzedniej regulacji.
2. Następnie wykonywana jest struktura *case*, pełniąc funkcję *breaka* – konieczna do ewentualnego zatrzymania pętli sterowania (pętli *for*).
3. Zerowanie wartości dla *shift registrów* – czyszczenie tablic przed kolejną regulacją.
4. Właściwa pętla regulacji, jej przebieg wygląda następująco:
 - pobranie wartości zadanych (przyspieszenia unormowanego i częstotliwości),
 - restartowanie regulatora PI (konieczne, gdyż funkcja ta pamięta ostatnie wartości wyjścia z regulatora, obliczone podczas poprzedniej regulacji),
 - regulator PI,
 - wymnożenie przez wartość K_w zależną od częstotliwości (przeliczenie wartości przyspieszenia na napięcie),
 - wysłanie wyznaczonych wartości do generatora,

- odczekanie niezbędnego czasu na dotarcie komendy i ustalenie się sygnału z generatora, w celu pomiaru wartości skutecznej,
 - odczyt sygnałów z karty i wyznaczenie wartości skutecznej,
 - wylczenie wartości maksymalnej przyspieszenia,
 - zaokrąglenie wyniku do trzeciego miejsca po przecinku,
 - sprawdzenie, czy wynik regulacji mieści się w przedziale założonego błędu,
 - koniec regulacji lub dalsze wykonywanie pętli,
 - oprócz powyższych, w pętli znajduje się blokowanie zapisu do pliku, sterowanie zmienną „przerwij program”, wizualizacja procesu, zabezpieczenie przed podaniem na generator wartości mniejszej niż 0.05V (w tym przypadku na wyświetlaczu pojawia się błąd).
5. Pomiar wartości międzyszczytowej sygnału z badanego czujnika i wydzielenie przez dwa w celu wyznaczenia amplitudy (umożliwia pracę z czujnikami ze składową stałą na wyjściu).
 6. „Zerowanie” nastaw generatora.
 7. Przejście do następnych danych, lub koniec procesu sterowania.
 8. Utworzenie *cluster*-a WYNIKI.
 9. Odblokowanie pola zapisu, przełączenie zmiennej „ustawcase” na zero.

Na rys.5. [4] przedstawiono przykładową charakterystykę amplitudowo-częstotliwościową akcelerometru tensometrycznego typu BWH201 wyznaczoną w zakresie 10÷150Hz z krokiem co 10Hz, która rysowana jest automatycznie w trakcie realizacji algorytmu. Czułość wzmacniacza Nexus wynosiła $K_w=0.1V/m/s^2$. Poza nieznacznym błędem dla częstotliwości $f=20Hz$ charakterystyka ta jest zgodna z charakterystyką podaną przez producenta. Czułość S_{CZ} badanego czujnika można wylczyć na podstawie wyznaczonego w procesie kalibracji stosunku amplitud napięć (rys.5) przy uwzględnieniu (1) z zależności:

$$S_{CZ} = \frac{U_x}{a} = \frac{U_x}{U} \cdot K_w \quad (9)$$

Stąd dla 10Hz czułość czujnika wynosi $S_{CZ}=0.181V/m/s^2$.



Rys. 5. Przykładowa charakterystyka amplitudowa czujnika przyspieszenia BWH.
Fig. 5. Exemplary amplitude characteristic of acceleration sensor BWH.

6. Literatura

- [1] Bobrowicz G.: Układ zasilania laboratoryjnego stołu wibracyjnego. Praca dyplomowa, Wydz. EAIiE AGH, Kraków 2002.
- [2] Brzózka J.: Regulatory i układy automatyki. Wyd. MIKOM, 2004.
- [3] Mielczarek W.: Urządzenia pomiarowe i systemy kompatybilne ze standardem SCPI. Wyd. Helion 1999.
- [4] Murawski P., Nowak A.: Opracowanie i implementacja algorytmu pomiarowo-sterującego w środowisku LabView do automatycznego wyznaczania charakterystyk dynamicznych akcelerometrów, Praca dyplomowa, Wydz. EAIiE AGH Kraków 2006.