

Michał PENKAŁA¹

Opiekun naukowy: Andrzej MACZYŃSKI², Marcin HONKISZ³

STANOWISKO DO BADANIA DRGAŃ W UKŁADZIE NIEZALEŻNEGO ZAWIESZENIA POJAZDU

Streszczenie: W referacie przedstawiono proces powstania stanowiska do badań drgań w układzie niezależnego zawieszenia pojazdu opierającego się na modelu pojazdu wraz zawieszeniem o wysokiej dokładności. Weryfikacje stanowiska wykonano poprzez przeprowadzenie pomiarów drgań. W celu zapewnienia wygodnej komunikacji oraz możliwości podglądu odczytywanych wartości zastosowano panel operatorski.

Słowa kluczowe: stanowisko dydaktyczne, panel HMI, mikrokontrolery, zawieszenie niezależne

STAND FOR TESTING VIBRATIONS IN THE INDEPENDENT SUSPENSION SYSTEM OF A VEHICLE

Summary: The article presents the process of creating a didactic stand for testing vibrations in the system of independent suspension of a vehicle based on a vehicle model with high accuracy suspension. The test stand was verified by conducting vibration measurements. An operator panel was used to ensure convenient communication and the possibility of viewing the read values.

Keywords: didactic stand, human-machine interface, microcontrollers, independent suspension system

1. Wprowadzenie

Wraz z powstaniem pierwszego pojazdu zasilanego silnikiem spalinowym w roku 1875 skonstruowanego przez Siegfrieda Marcusa, a już na pewno od 1913 roku, gdy

¹ inż., Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Wydział Zarządzania i Transportu, kierunek: Transport, specjalność: Transport drogowy, email: m.penkala92@gmail.com

² prof. ATH dr hab. inż., Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Wydział Zarządzania i Transportu, email: amaczynski@ath.eu

³ mgr inż., Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Wydział Zarządzania i Transportu, email: mhonkisz@ath.eu

Henry Ford usprawnił ich produkcję poprzez wprowadzenie montażu taśmowego, ludzkość wkroczyła w złoty wiek motoryzacji, który trwa aż do dziś. Samochód jednak to nie tylko silnik i nadwozie, ale także układy, które pozwalają na przeniesienie mocy wytwarzanej przez jednostkę napędową na koła oraz umożliwiają utrzymanie zadanego toru jazdy.

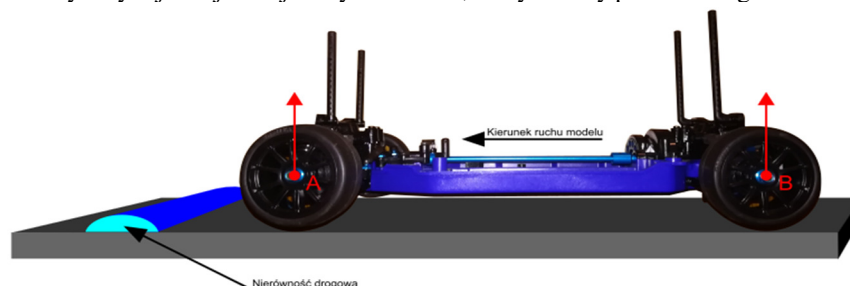
Jednym z najważniejszych, a nie zawsze docenianych, układów jest zawieszenie. Głównym zadaniem zawieszenia pojazdu jest przenoszenie powstałych sił w miejscu styku koła oraz jezdni na nadwozie. Ma ono bardzo duży wpływ na bezpieczeństwo i komfort jazdy.

Na przestrzeni lat zespoły badawcze niejednokrotnie podejmowały tematykę analizy oraz obserwacji pracy zawieszenia pojazdu. Sprzęt pomiarowy wysokiej klasy wykorzystywany do tego typu badań wymaga dużych nakładów finansowych oraz specjalistycznej wiedzy. Aby ułatwić badania niejednokrotnie upraszcza się model pojazdu i/lub wyodrębnia dany system pojazdu oraz elementy bezpośrednio z nim związane. Modele tego typu, mimo czasem znacznych uproszczeń, stanowią podstawę dla realnych systemów, dzięki czemu użytkownik stanowiska jest w stanie łatwiej przyswoić sobie zasady jego działania.

Układ zawieszenia jest bardzo częstym obiektem badawczym z racji złożoności budowy oraz podatności na modyfikacje. Badania pozwalają na analizy różnych kompletacji i obserwację odpowiadających im zachowań. W poniżej pracy zaprezentowano stanowisko do badania niezależnych zawiesznień pojazdu. Zastosowanie panelu operatorskiego IFM stosowanego w przemyśle maszyn mobilnych, magistrali CAN oraz mikrokontrolerów umożliwia działanie układu sterującego stanowiskiem w czasie zbliżonym do rzeczywistego.

2. Koncepcja stanowiska badawczego

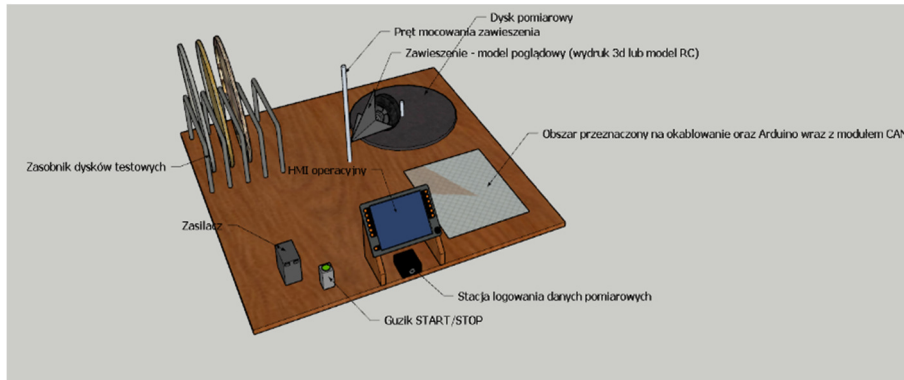
W założeniach projektowych stanowisko badawcze ma umożliwić przeprowadzenie prac badawczych polegających na symulacji ruchu pojazdu po nierównym terenie oraz rejestrację powstałych drgań. Drgania kół zostają odczytane poprzez cztery akcelerometry umieszczone po jednym na każdym z wahaczy. Dodatkowym elementem układu pomiarowego jest przetwornik drgań umieszczony w środku geometrycznym jednej z osi jezdnych modelu, który mierzy powstałe drgania modelu.



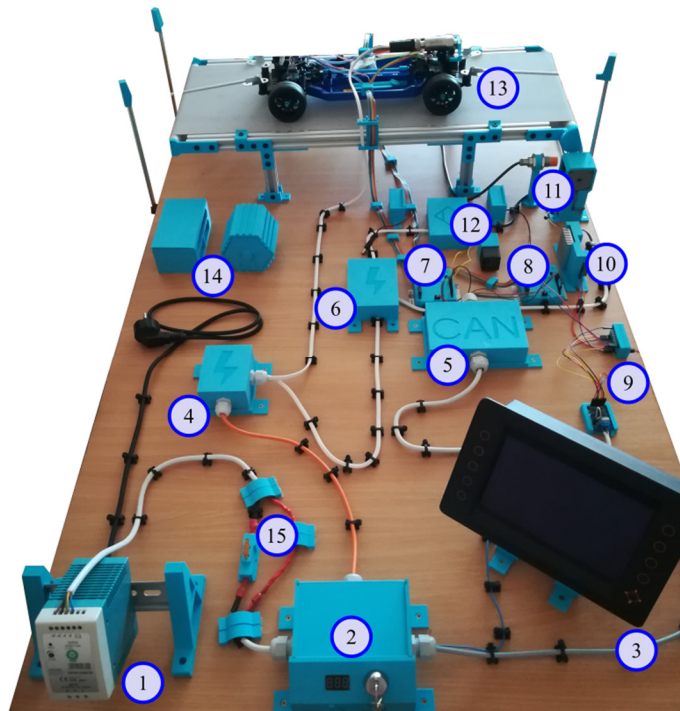
Rysunek 1. Istota badanego zjawiska, A-oś przednia, B-oś tylna

Podwozie pojazdu zdalnie sterowanego RC (*Remote Control*) o wysokiej skali dokładności 1:10 pełni rolę modelu badawczego. Zadaniem układu sterowania jest

umożliwienie zmiany prędkości jazdy. W rezultacie model pozwala na rejestrację odczytywanych wartości z czujników w czasie rzeczywistym dla różnych warunków jazdy oraz ich eksport do pliku .CSV np. w celu ich późniejszych analiz.



Rysunek 2. Konceptyjny model stanowiska badawczego powstały w wczesnej fazie pracy



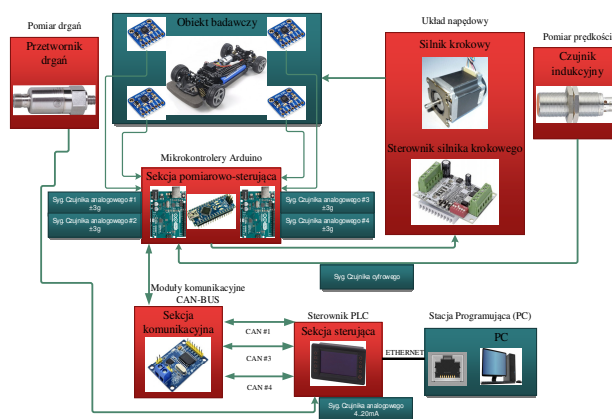
Rysunek 3. Finalny wygląd stanowiska badawczego

Na rys. 2 i 3 przedstawiono budowę modelu stanowiska na różnych etapach jego powstawania. Pierwszy z nich (rys. 2) prezentuje projekt koncepcyjny, który już w tej fazie projektowania uwzględniał najważniejsze elementy układu sterującego wraz

z elementami kluczowymi do jego poprawnego działania. Drugi (rys. 3) przedstawia ukończony projekt stanowiska badawczego, w którym elementy sterujące znajdują się w przedniej części ułatwiając tym samym użytkownikowi obsługę oraz zabezpieczając go przed bezpośrednim kontaktem z elementami ruchomymi. W skład stanowiska wchodzi następujące elementy: 1 – zasilacz sieciowy 230 V/24 V, 2 – konsola zasilająca, 3 – panel operatorski IFM CR1081, 4 – mała rozdzielnia prądowa, 5 – moduł komunikacyjny z dwoma modułami CAN-bus MCP2515, 6 – duża rozdzielnia elektryczna 7, 8 – mikrokontrolery Arduino UNO, 9 – mikrokontroler Arduino Nano wraz z modułem CAN-bus MCP2515, 10 – sterownik silnika krokowego TB6560, 11 – układ przeniesienia napędu wraz z czujnikiem indukcyjnym IG7105, 12 – przekaźnik samochodowy, 13 – model badawczy, 14 – pojemniki z częściami zapasowymi oraz przeszkodami drogowymi, 15 – bezpiecznik 24 V/5 A.

2.1. Budowa układu sterowania

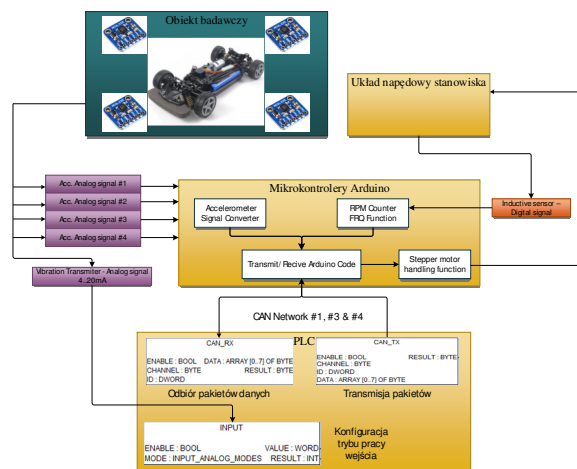
Budowę układu sterowania przedstawiono z dwóch perspektyw. Pierwsza jest perspektywą konstrukcyjną, druga – programową. Na schemacie z rys. 4 zaprezentowano urządzenia, elementy, sygnały pomiarowych i sterujące oraz połączenie sieci CAN. Schemat programowy z rys. 5 uwzględnia sieć wymiany danych pomiędzy kontrolerami, sposób przetwarzania sygnałów oraz parametryzację bloków funkcyjnych dla potrzeb programu.



Rysunek 4. Schemat układu sterowania z perspektywy konstrukcyjnej

Z perspektywy konstrukcyjnej stanowisko badawcze można opisać w następujący sposób. Otrzymywane z akcelerometrów ADXL335 sygnały analogowe zostają poddane przetworzeniu. Proces ten realizują dwa mikrokontrolery Arduino UNO, przy czym jeden kontroler obsługuje dwa czujniki. Sygnał analogowy z przetwornika drgań (IFM VTV122) jest przesyłany bezpośrednio do panelu operatorskiego CR1081. Tego typu połączenie zostało narzucone przez specyfikację techniczną czujnika, dla którego napięcie zasilające wynosi 9,6...24 V. Mikrokontrolery wymagają natomiast napięcia 5V. Układ napędowy zbudowany jest z dwóch zasadniczych elementów: sterownika silnika krokowego TB6560 oraz samego silnika krokowego (TECO 24 V/0,35 A). Stworzony układ napędowy swoją budową zbliżony

jest to tych stosowanych w branży motoryzacyjnej, gdzie silniki wyposażone są w sterowniki kontrolne nadzorujące ich pracę (Engine ECU). Prędkość obrotowa zadawana jest bezpośrednio z panelu operatorskiego, a jej wartość zostaje obliczona na podstawie odczytów czujnika indukcyjnego (IFM IG7105), z którego sygnał trafia do mikrokontrolera. Aby jednak było to możliwe niezbędne jest zastosowanie przekładnika samochodowego 24 V, aby uniknąć uszkodzenia mikrokontrolerów. Komunikacja i wymiana danych pomiędzy mikrokontrolerami a panelem operatorskim odbywa się przy użyciu magistrali CAN, która została omówiona w dalszej części pracy. Dzięki zastosowaniu interfejsów CAN-BUS MCP2515, będących elementem pośredniczącym, komunikacja tych dwóch urządzeń jest możliwa.



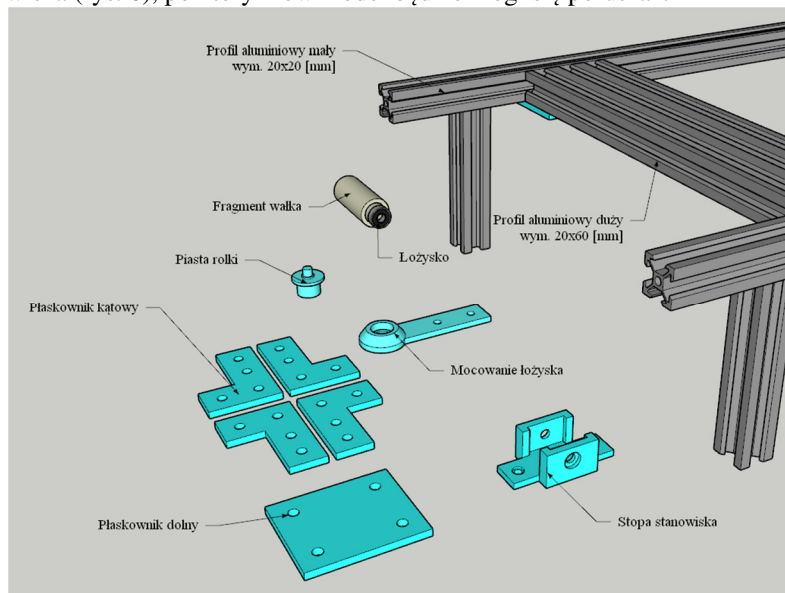
Rysunek 5. Schemat układu sterowania z perspektywy programowej

Perspektywa programowa stanowiska badawczego prezentuje się w następujący sposób. Odbiór i konwersja sygnałów analogowych z akcelerometrów zostaje wykonana na poziomie mikrokontrolerów. Po wykonaniu tej operacji przetworzone wartości zostają przypisane do zmiennych typu INT, a następnie poddane konwersji INT_TO_BYTE i wysyłane poprzez sieć CAN do panelu operatorskiego. Na panelu ich wartości są wyświetlane oraz zwizualizowane za pomocą dynamicznych elementów graficznych. Domyślny tryb pracy wejścia w panelu operatorskiego ustawiony jest na obsługę sygnałów cyfrowych. Aby możliwy był odczyt z prądowego czujnika analogowego należy przeprowadzić jego dodatkową konfigurację. Zmiana trybu pracy wejścia wykonana jest poprzez blok funkcyjny INPUT, przy czym o tym trybie pracy blocka decyduje zmienna INPUT_ANALOG_MODES na jego wejściu. Sygnał analogowy z transmitera drgań zostaje odebrany i poddany konwersji liniowej przy pomocy blocka funkcyjnego LIN_TRAFO. Na podstawie znanego zakresu pomiarowego na wejściu (4...20 mA) oraz zakresu częstotliwości pomiarowych (10...1000 Hz) otrzymano wartość na wyjściu typu REAL, która zostaje przypisana do zmiennej tego samego typu oraz wyświetlona na panelu HMI. Sterowanie silnikiem krokowym odbywa się przy użyciu impulsów sygnałów binarnych typu BOOL wykorzystywanych w zasilaniu uzwojeń. Silnik przekształca otrzymane impulsy elektryczne w dyskretne ruchy mechaniczne. Prędkość obrotowa jest uzależniona od częstotliwości tych impulsów. Jej odczyt

dokonywany jest poprzez odczyt sygnału cyfrowego z czujnika indukcyjnego. Przekaznik samochodowy w tym w układzie pełni funkcję przycisku. Tryb pracy wejścia zdefiniowany został, jako INPUT_PULLUP. Zmierzona częstotliwość występowania stanu wysokiego na wejściu pozwala na wyliczenie prędkości obrotowej układu napędowego, a która następnie przesłana operatorowi. Przy użyciu bloczków funkcyjnych CAN_RX oraz CAN_TX po stronie panelu HMI egzekwowana jest transmisja oraz odbiór pakietów danych. Odpowiednikiem tych bloków funkcyjnych jest biblioteka dedykowana dla Arduino do obsługi modułów CAN-BUS MCP2515. W obu przypadkach należy wstępnie przeprowadzić parametryzację sieci CAN. Rezystancja na złączach CAN_H oraz CAN_L musi wynosić $\pm 60 \Omega$. W przypadku braku wymaganej wartości rezystancji komunikacja jest niemożliwa. Z poziomu programatorów wymagany jest ustawienie identycznej prędkości transmisji BAUD_RATE, kanału transmisji CAN_CHANNEL oraz adresacji ramek DATA_OBJECT_ID dla transmisji. Po przeprowadzeniu tych operacji możliwym się staje przesyłanie pakietów danych.

2.2. Budowa konstrukcji nośnej stanowiska badawczego

Poza samym modelem pojazdu wraz jego zawieszeniem istotnym było wykonanie stanowiska (rys. 6), po którym ów model będzie mógł się poruszać.

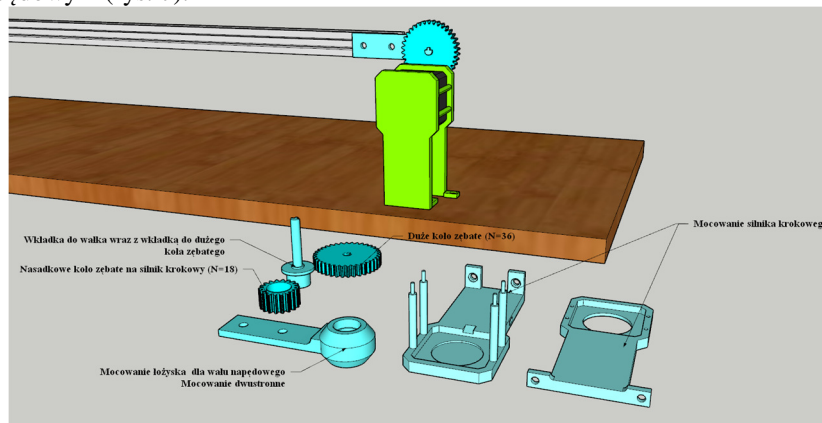


Rysunek 6. Elementy składowe konstrukcji nośnej stanowiska badawczego

Najdogodniejszym rozwiązaniem było wykorzystanie profili aluminiowych stosowanych przy budowie drukarek 3D oraz maszyn CNC. Wykonana w sposób modułowy konstrukcja jest lekka, a jednocześnie wytrzymała. Modułowość wynika z budowy w systemie V-Slot. Bazuje ona na wykorzystaniu śrub M5 oraz wpustów rowkowych. Pozwoliło to na swobodny montaż oraz łatwą modyfikację. Dodatkowo korzystając z technologii druku 3D zostały precyzyjnie wykonane brakujące elementy konstrukcji takie jak:

- płaskowniki,
- stopa stanowiska,
- piasta rolki,
- mocowanie łożyska
- układ przeniesienia napędu.

Aby zapewnić płynny ruch taśmy nawierzchniowej wykorzystano rozwiązania stosowane w przenośnikach taśmowych lub w układzie jezdnym ciężkich maszyn bojowych, w których jeden wałek bądź oś pełni rolę napinacza, a drugi jest elementem napędowym (rys. 7).



Rysunek 7. Elementy składowe układu wałka napędowego

3. Parametryzacja stanowiska

Pierwszą istotną rzeczą, której należało podjąć po wybudowaniu stanowiska, a przed wykonaniem zasadniczych badań, była jego parametryzacja. Jej celem była:

- kontrola poprawności podłączenia poszczególnych elementów stanowiska i ustawienie parametrów komunikacyjnych wraz z mapowaniem zmiennych w sekcji odbioru oraz wysyłki pakietów danych,
- sprawdzenie jakości przetwarzania sygnałów z elementów pomiarowych i poprawności ich wyświetlania na panelu HMI,
- testy poprawności funkcjonowania układu napędowego.

3.1. Ustawienia komunikacji

Pierwszy etap parametryzacji obejmował przeprowadzenie kontroli poprawności połączeń oraz ustawień komunikacyjnych magistrali CAN. Poprawnie działająca sieć była niezbędna do wykonania dalszych czynności kontrolnych oraz badawczych. W celach diagnostycznych skorzystano z bloczka funkcyjnego CAN_Enable (Codesys), funkcji CAN.begin oraz CAN.setMode (Arduino IDE) zawartych w bibliotece <mcp_can.h> (rysunek 8). W obu aplikacjach ustawiono jednakową prędkość transmisji (Baudrate) równą 125 kb/s. W przypadku ustawienia innych prędkości z komunikowanie urządzeń z sobą byłoby niemożliwe. Dodatkowo

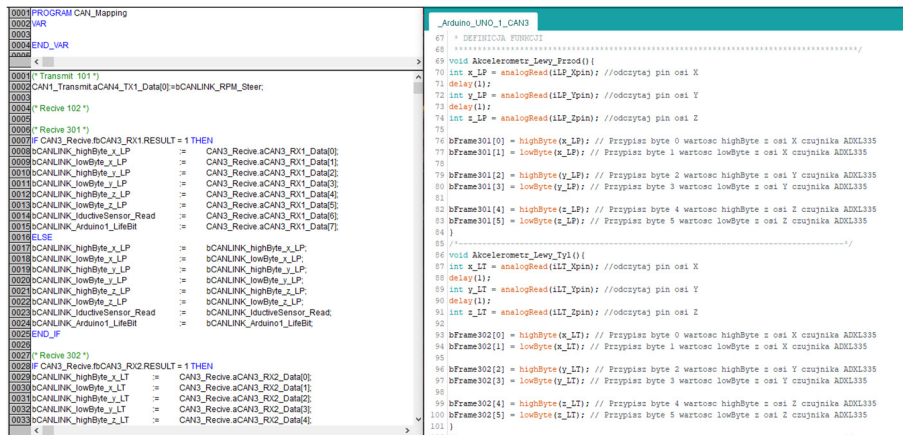
w programatorze dla panelu operacyjnego należało określić na wejściu bloczka, który kanał będzie aktywny (CHANNEL). W założeniach wstępnych projektu wymagano aktywnych trzech z czterech możliwych kanałów CAN panelu operatorskiego, co przekładało się na zastosowanie trzech modułów CAN-bus. Dla Arduino dodatkowo niezbędnym było określenie taktowania kwarcu modułu MCP2515 wynoszącego 8 MHz. W przypadku pozostawienia wartości domyślnej 16 MHz występował błąd związany z przepełnieniem bufora CAN.



Rysunek 8. Konfiguracja magistrali CAN w programatorze Codesys 2.3 (po lewej) oraz Arduino IDE (po prawej)

W celach testowych stworzono prosty program w obu programatorach, który egzekwował zarówno wysyłkę jak i odbiór standardowych ramek CAN. Zarówno panel jak i mikrokontrolery odebrały oraz wysłały ramkę zawierającą numerację kolejnych bajtów. Stanowiło to potwierdzenie poprawnie wykonanej konfiguracji magistrali CAN.

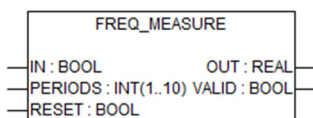
Następnie wykorzystano wcześniej stworzone programy, jako programy wzorcowe i wykonano przy ich użyciu mapowanie zmiennych (rysunek 9). Dla każdego z procesu stworzono oddzielne podprogramy. Pozwoliło to na zachowanie czystości i przejrzystości kodu programu.



Rysunek 9. Mapowanie zmiennych do poszczególnych bajtów ramki CAN przeznaczonej do wysyłki lub odbioru

3.2. Parametryzacja odczytów z czujników

Jak wspomniano wcześniej, stanowisko zostało wyposażone zarówno w czujniki cyfrowe jak i analogowe. W przypadku cyfrowego czujnika indukcyjnego większa kalibracja nie była wymagana. Wiąże się to ze sposobem jego pracy. Otrzymywany z niego sygnał jest jednocześnie zmienną wejściową bloczka funkcyjnego `FREQ_MEASURE` (rys. 10) odpowiedzialną za obliczenie częstotliwości występowania wysokiego sygnału cyfrowego. W ten sposób wyliczona jest rzeczywista prędkość obrotowa wałka silnika krokowego, co z kolei pozwoliło na dodanie funkcji bezpieczeństwa polegającej na zatrzymaniu symulacji w przypadku zacięcia się elementów ruchomych. Funkcja działa na zasadzie ciągłego porównywania zadanej prędkości obrotowej z wyliczoną przy pomocy sygnału z sensora. W przypadku wystąpienia spadku prędkości o przyjętą z góry wartość i utrzymania tego stanu przez określony czas uruchomiona zostaje funkcja bezpieczeństwa.



Rysunek 10. Graficzne przedstawienie bloczka funkcyjnego `FREQ_MEASURE` w bibliotece programu `Codesys 2.3`

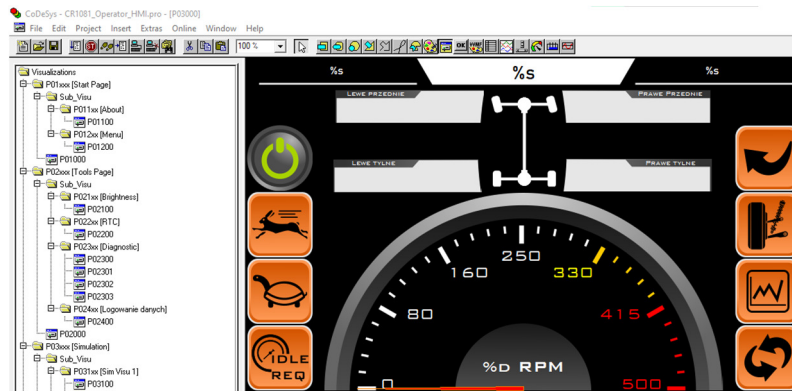
Druga grupa czujników o odczycie analogowym wymagała wykonania kilku etapowej parametryzacji. W skład tego procesu wchodziły następujące kroki:

- wykonanie konwersji z dwóch zmiennych typu `BYTE` do pojedynczej zmiennej typu `INTEGER` (krok zarezerwowany wyłącznie dla akcelerometrów),
- prezentacja odczytanych, nieprzetworzonych wartości na wizualizacjach diagnostycznych,
- wykonanie transformacji liniowej przy pomocy bloczka funkcyjnego `LIN_TRAFO` dla zakresu pomiarowego określonego przez karty katalogowe czujników,
- wykonanie konwersji z jednostki przyspieszenia grawitacji [`g`] na jednostkę przyspieszenia według `SI` wyrażaną w [`m/s2`] (krok zarezerwowany wyłącznie dla akcelerometrów),
- ustawienie zmiennych kompensujących dla wartości odczytanych z czujników,
- kalibracja zakresu liczbowego dla poszczególnych trendów metodą empiryczną.

3.3. Układ napędowy

Sterowanie prędkością odbywa się z poziomu wizualizacji w sekcji symulacja (rysunek. 11). Zmienna typu `BYTE` z zakresu `0..100` jest modyfikowana przy pomocy odpowiednio przycisków z symbolem królika (inkrementacja wartości o 1) lub symbolem żółwia (dekrementacja wartości o 1). Po stronie mikrokontrolera korzystając z funkcji `map()` będącą odpowiednikiem `LIN_TRAFO` sparametryzowano

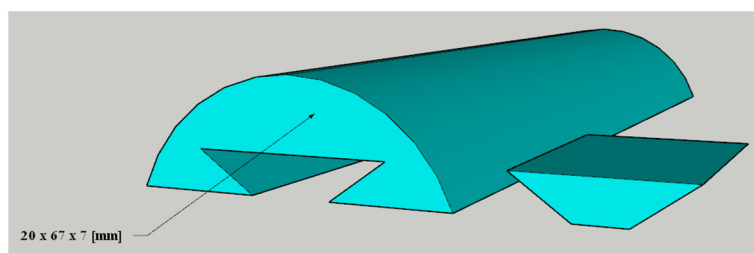
zmienną sterującą prędkością obrotową wału silnika krokowego. Zakres prędkości obrotowych silnika krokowego określono metodą empiryczną i wynosiła ona 1000 obr./min. Prędkość tak jednak została osiągnięta przy braku obciążenia w postaci modelu czy maty jezdnej. Przy zastosowanym przełożeniu kół zębatych w stosunku 2:1 pomiędzy silnikiem krokowym a wałkiem napędowym maty jezdnej wyliczono faktyczną prędkość obrotową i wynosiła ona 500 obr./min.



Rysunek 11. Główna wizualizacja kontrolująca przebieg badania

4. Przeprowadzenie badań stanowiskowych

Etap badawczy został podzielony na dwie części. Pierwsza część obejmuje wykonanie kilku przejazdów testowych mających na celu kontrolę przeprowadzonej parametryzacji oraz sprawdzenie poprawności działania całego stanowiska. Przejazdy ten cechuje brak przeszkód drogowych, co skutkuje niemal zerowymi wartościami przyśpieszenia drgań. Drugim etapem przeprowadzanych badań stanowiskowych było wykonanie kilku przejazdów po przeszkodach drogowych w formie progu zwalniającego (rys. 29) dla różnych prędkości obrotowych wałka napędowego.



Rysunek 12. Model 3D przeszkody drogowej wraz z mocowaniem

Otrzymane wartości dla różnych prędkości obrotowych zestawiono w formie wykresów oraz wykonano porównanie z wynikami zawartymi w pracach (Czech P., Łazarz B., Malczewski B., Witaszek K., Witaszek M., 2015) oraz (Nkomo I.L., Dove A., Ngwako T.M., Nyandoro T.O., 2017). Otrzymane wyniki pomiarowe pozwoliły

na odniesienie się do założonych na początku pracy hipotez. Wnioski zostały umieszczone w rozdziale podsumowującym pracę.

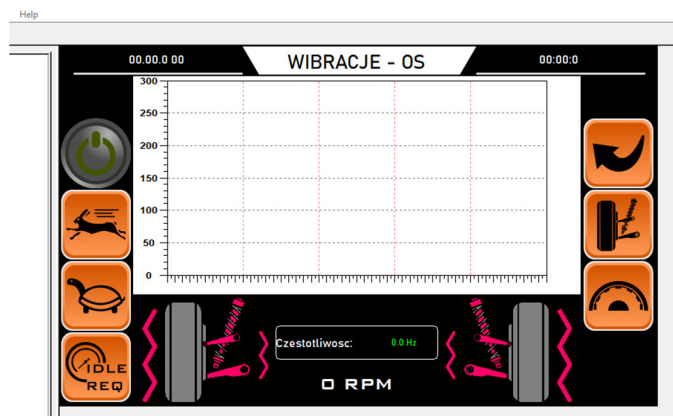
4.1. Przejazdy testowe

Założono, że pomiary testowe będą realizowane dla pięciu prędkości obrotowych wałka napędowego maty jezdnej. Pierwszą z nich był prędkość jałowa wynosząca 35 obr./min, którą osiąga silnik krokowy w po uruchomieniu stanowiska. Następnie zwiększano prędkość do kolejno 75, 140, 200 oraz maksymalnej możliwej obr./min. Sam model pojazdu nie był w żaden sposób obciążony. W trakcie przejazdu testowego dokonano pomiaru drgań przy pomocy przetwornika drgań. Otrzymane wartości zestawiono na wykresie (rysunek 15) przy użyciu programu Excel wchodzącego w skład MS Office. Wykonanie tej operacji było możliwe dzięki stworzeniu podprogramu logującego wyniki pomiarów w panelu operatorskim do plików w formacie .CSV (rysunek 13).

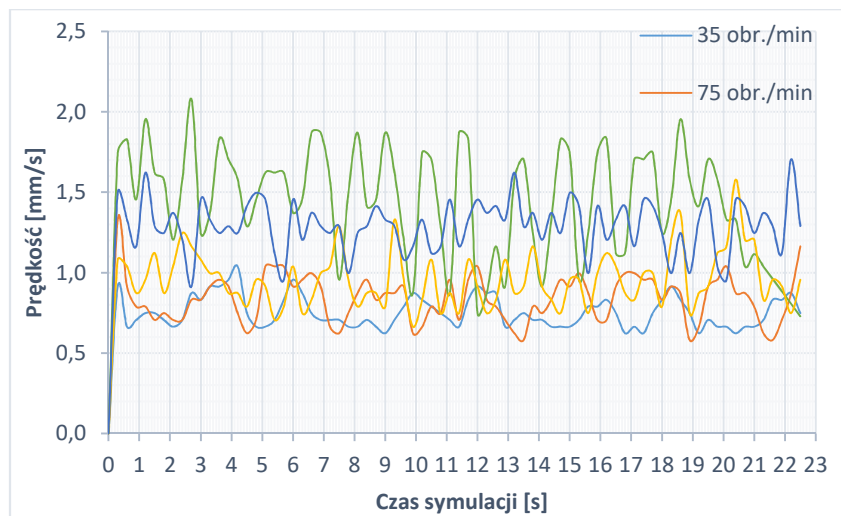
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
DATA, CZAS SYMULACJI, BLEDY, RPM SILNIKA, DRGANIA, ACC LP X, ACC LP Y, ACC LP Z, ACC LT X, ACC LT Y, ACC LT Z, ACC PP X, ACC PP Y, ACC PP Z, ACC PT X, ACC PT Y, ACC PT Z															
21.10.2020, T#538ms, 0,40,41.14688,0,0,-0.230146,0,0,0,0,0.17261,0,0,0,0,-0.115073,-0.0575371,0.115073,0.0575371,-0.172609															
21.10.2020, T#828ms, 0,45,39.53812,0,0,-0.17261,-0.115073,0.0575371,0.115073,0,0,0.115073,0,0,-0.115073,0.115073,0.115073,0.07															
21.10.2020, T#1s117ms, 0,50,29.63813,0,0,0.0575361,0,0,0.115073,0,0,0,0,0,-0.287683,0.172609,0.0575361,-0.0575361,0.115073,0.53715															
21.10.2020, T#1s405ms, 0,55,23.07937,0,0,-0.0575371,0.115073,0.287683,-0.0575361,0,0,-0.115072,0,0,-0.17261,-0.230146,0.0575371,-0.05753610															
21.10.2020, T#1s689ms, 0,60,19.73812,0,0,-0.115073,0.17261,0.115073,0,0,0,0.287683,-0.0575361,-0.0575371,0.172609,-0.05753															
21.10.2020, T#1s981ms, 0,65,24.68813,0,0,-0.115073,0.402757,-0.345221,0.0575371,0,0,0.345221,-0.230146,0.115073,0.115073,0,0,0.17261522536															
21.10.2020, T#2s267ms, 0,70,42.8175,0,0,-0.17261,-0.230146,-0.172609,-0.0575361,0,0,0.230147,-0.0575361,-0.115073,0.115073,0,0,0.2876839609															
21.10.2020, T#2s557ms, 0,70,47.7675,0,0,-0.0575371,0.115073,-0.172609,0,0,0,0.115073,-0.0575361,-0.17261,0.172609,0.115073,-															
21.10.2020, T#2s840ms, 0,75,36.25875,0,0,-0.17261,-0.115073,-0.230146,-0.0575361,0,0,-0.172609,-0.0575361,0.115073,0.057536															
21.10.2020, T#3s122ms, 0,75,26.35875,0,0,-0.17261,-0.115073,-0.172609,-0.230146,0,0,0.115073,0.0575371,-0.17261,0.230146,0.287683,-0.172609361															
21.10.2020, T#3s408ms, 0,80,19.73812,0,0,-0.230146,0.0575371,-0.172609,0,0,0,0.51783,0.0575371,0,0,0.0575361,-0.115073,-0.11507															
21.10.2020, T#3s696ms, 0,90,21.40875,0,0,-0.0575371,0.115073,-0.115073,-0.0575361,0,0,0.0575361,-0.115073,-0.115073,0.11507															
21.10.2020, T#3s982ms, 0,90,27.9675,0,0,-0.0575371,-0.115073,-0.172609,0.0575371,0,0,0.460294,0.0575371,-0.0575371,0.172609,0.1726															

Rysunek 13. Wycinek z pliku stworzonego przez podprogram logujący dane pomiarowe

Dodatkowo korzystając z wykresów trendu wchodzącego w skład narzędzi programatora Codesys 2.3 dodano operatorowi możliwość podglądu wartości drgań w czasie rzeczywistym (rysunek 14).



Rysunek 14. Wizualizacją umożliwiającą podgląd drgań modelu w czasie rzeczywistym w programatorze Codesys 2.3



Rysunek 15. Zarejestrowane przebiegi drgań dla różnych prędkości obrotowych przy użyciu przetwornika VTV 122 w trakcie przejazdu testowego

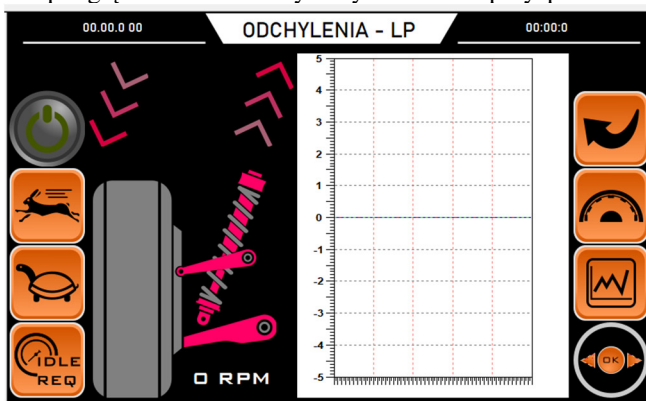
W trakcie wykonywanych przejazdów testowych oraz na podstawie otrzymanych wykresów drgań zauważono wysokie wskazania częstotliwości drgań dla prędkości obrotowej 140 obr./min. Wartości te związane są z powstałym rezonansem mechanicznym będącym jedną z wad silników krokowych objawiającym się znacznie głośniejszą pracą silnika. Postanowiono wykluczyć ten zakres prędkości obrotowej z dalszych pomiarów.

Również w etapie przejazdów testowych określono największą możliwą prędkość obrotową wału napędowego przy zamontowanym modelu pojazdu oraz przeszkodach drogowych. Wynosiła ona 250 ± 10 obr./min i cechowała się pracą ciągłą, pozbawianą przerwań w wyniku zakleszczenia się kół zębatych lub zaniku mocy napędowej z powodu zbyt dużego obciążenia.

4.2. Przejazdy badawcze

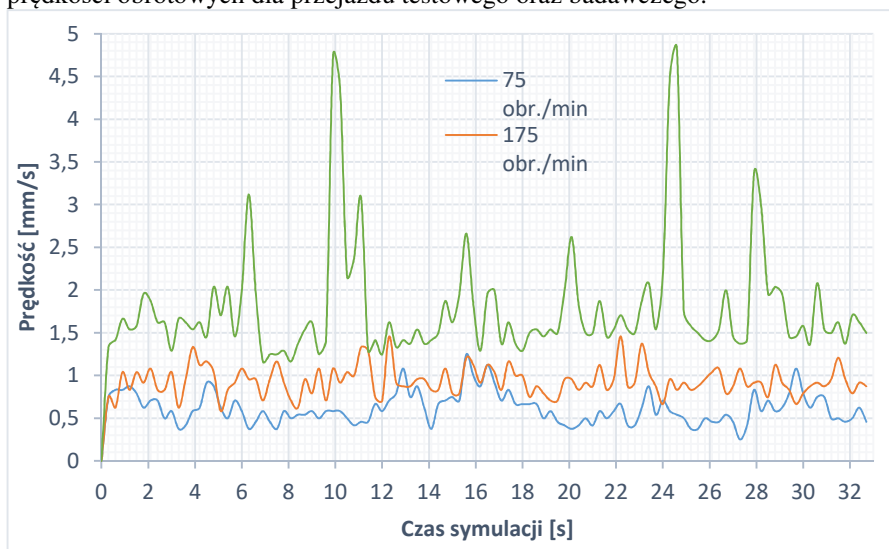
Plan wykonania przejazdu badawczego zakładał wykorzystanie zdobytej już wiedzy oraz informacji z wcześniej wykonanego przejazdu testowego. Na podstawie przeprowadzonych obserwacji pracy układu napędowego wyznaczono trzy prędkości obrotowe, przy których nastąpią pomiary drgań oraz przyspieszeń na wahaczach modelu pojazdu. Są to kolejno 75, 175 oraz 250 obr./min. Zrezygnowano z prędkości jałowej z powodu zbyt wolnej transmisji taśmy oraz potrzebą wydłużenia cyklu badawczego. W założeniu projektowym prędkość jałowa przeznaczona była do wstępnej obserwacji pracy modelu oraz wychwyceniu ewentualnych usterek. Dodatkowo prędkość jałowa generuje podobne, jak nie takie większe, drgania modelu jak przy prędkości równej 75 obr./min, co zostało przedstawione na wykresie (rysunku 17). Zrezygnowano również z prędkości równej 140 obr./min z powodu powstającego rezonansu. Została ona zastąpiona wartością 175 obr./min notującą znacznie mniejsze drgania, lecz będące w oczekiwanym zakresie pomiędzy mniejszą oraz większą prędkością obrotową. Każdy przejazd badawczy trwał trzy pełne obroty

pasa transmisyjnego, przy czym dane pomiarowe zapisywane są, co $\Delta t = 0,3$ s. Umieszczenie czterech par przeszkód drogowych dało gwarancję otrzymania dużej ilości odczytów do omawianej w dalszej części pracy analizy. Podobnie jak w przejazdów testowych przygotowano specjalne wizualizacje (rysunek 16) pozwalające na podgląd w czasie rzeczywistym wartości przyspieszeń.

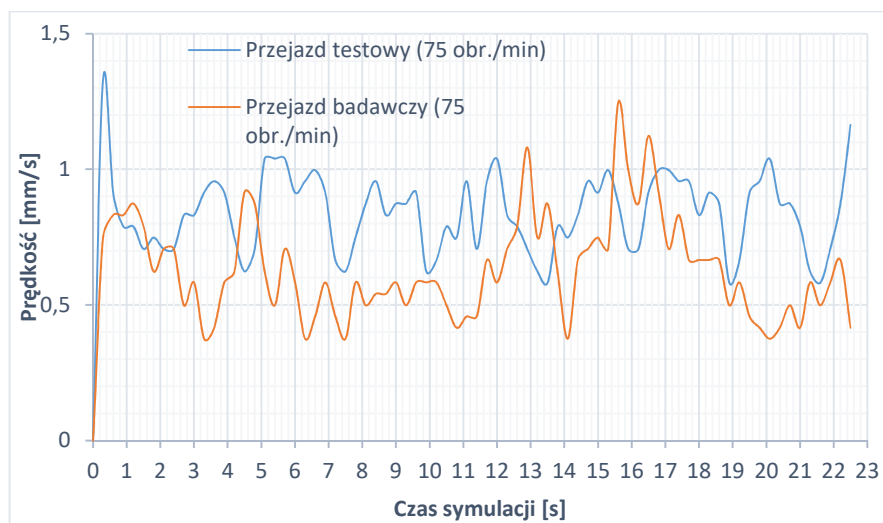


Rysunek 16. Wizualizacja umożliwiająca operatorowi podgląd przyspieszeń w czasie rzeczywistym dla poszczególnego wahacza w modelu pojazdu

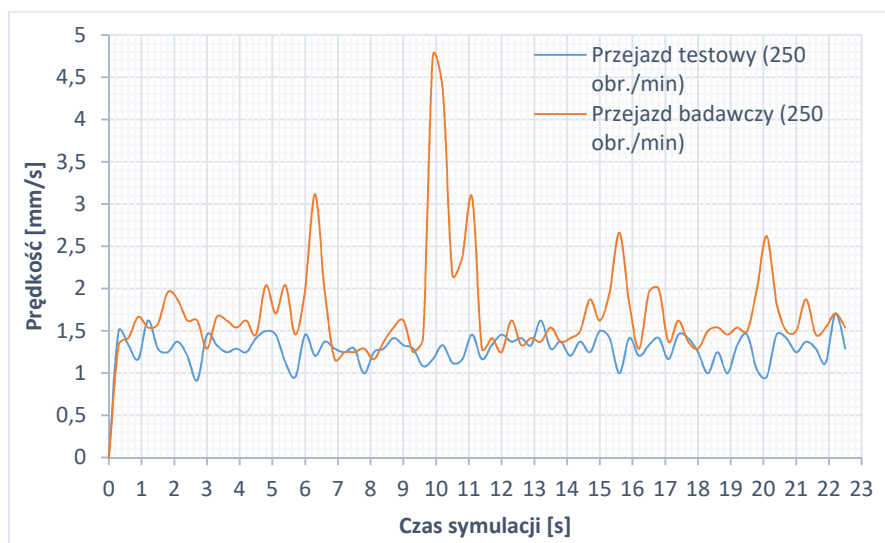
Przebieg drgań odczytanych podczas przejazdu badawczego przy pomocy transmitera drgań VTV122 przedstawiono na wykresie (rysunek 17). Widoczne stają się charakterystyczne piki powstałe w wyniku natarcia koła modelu na przeszkodę drogową oraz pracę samego zawieszenia. Kolejne wykresy (rysunek 18 oraz rysunek 19) przedstawiają zestawienie otrzymanych wartości dla skrajnych badanych prędkości obrotowych dla przejazdu testowego oraz badawczego.



Rysunek 17. Zarejestrowane przebiegi drgań przy użyciu przetwornika VTV 122 dla badanych prędkości obrotowych w trakcie przejazdu badawczego



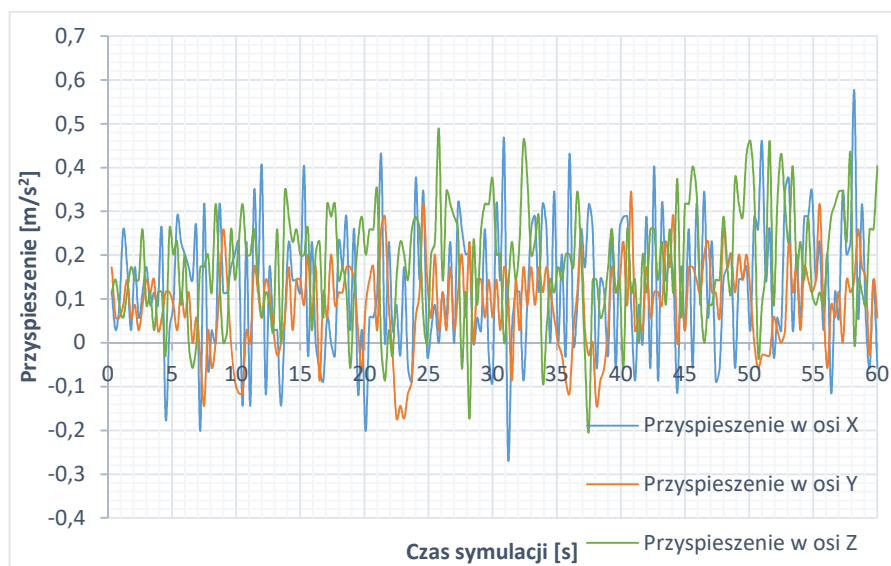
Rysunek 18. Zestawienie wartości przebiegów drgań zarejestrowanych dla obu przejazdów przy użyciu przetwornika VTV 122 przy prędkości obrotowej 75 obr./min



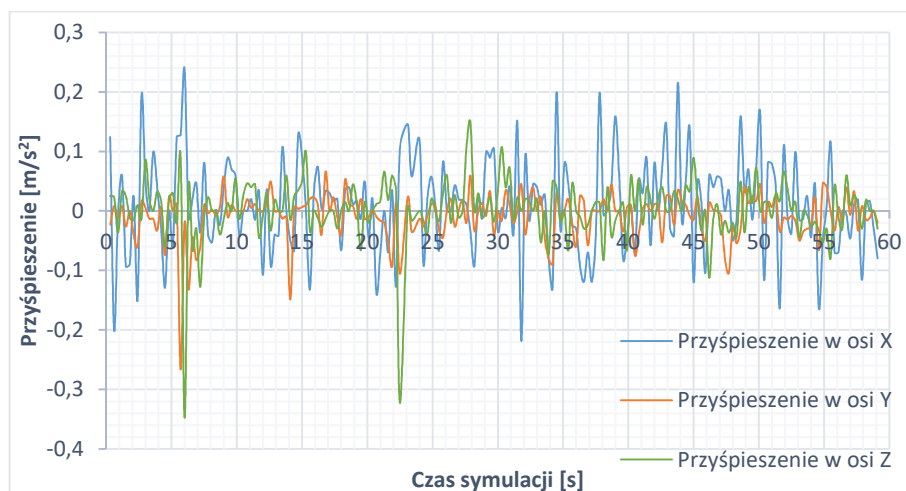
Rysunek 19. Zestawienie wartości przebiegów drgań zarejestrowanych dla obu przejazdów przy użyciu przetwornika VTV 122 przy prędkości obrotowej 250 obr./min

Analizując zestawione ze sobą wartości z przejazdu testowego oraz badawczego zauważalnym jest fakt, że wartości drgań są do siebie zbliżone w momencie braku najazdu na przeszkodę. Moment najazdu jednak jest jednak łatwiejszy do spostrzeżenia przy mniejszej prędkości z powodu zmniejszonej płynności jazdy. Różnica ta jednak zaciera się przy prędkości większej gdzie dynamika jazdy jest jednak płynniejsza.

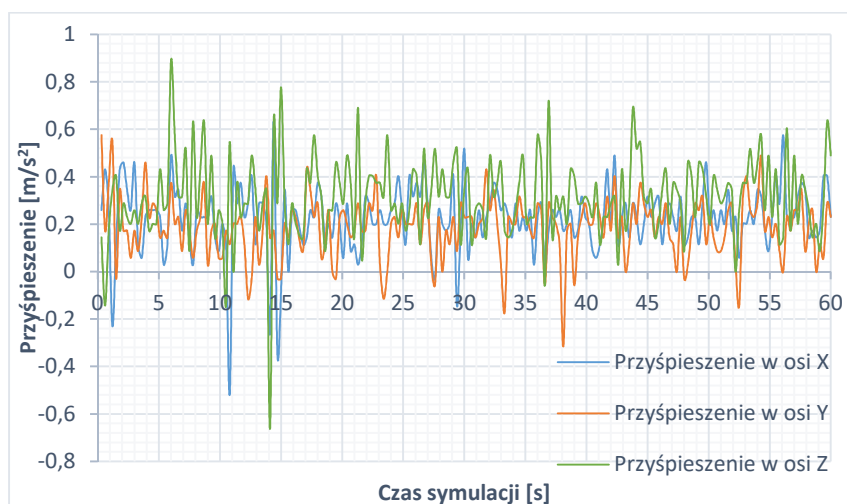
Zanotowane przyspieszenia podczas przejazdu badawczego dla trzech różnych prędkości obrotowych zostały przedstawione na kolejno rysunkach 20, 21, 22. Wykorzystując znaczną ilość zdobytych próbek oraz fakt, że każde koło pokonuje identyczną przeszkodę, posiada takie same parametry techniczne (sprężyna, olej amortyzatora, stopień docisku sprężyny) dokonano uśrednienia wyników. Spostrzec można znaczną różnicę w wartościach pomiędzy poszczególnymi wykresami. Ciekawym rozkładem charakteryzują się przyspieszenia odnotowane dla prędkości obrotowej równej 140 obr./min. Pomimo kilku pojedynczych pików wartości przyspieszeń są mniejsze niż dla wartości 75 obr./min. Wynikać to może z charakterystyki pracy silnika. Przy niskich obrotach pracuje spokojnie, lecz model ma trudności z pokonaniem progów, za to przy maksymalnej wartości prędkości obrotowej mimo płynnej jazdy wstrząsy silnika znacząco wpływają na odczyty. Odnosząc się do prac referencyjnych wspomnianych na początku niniejszego rozdziału nie kierowano się w tak znacznym stopniu wartościami, co samym przebiegiem funkcji w momencie najazdu na przeszkodę. Odnotowane pewne podobieństwa, lecz nie były one przekonujące, co zostało ujęte w podsumowaniu pracy.



Rysunek 20. Uśrednione wartości przyspieszeń dla trzech osi (X, Y, Z) dla prędkości obrotowej 75 obr./min w ciągu trwania minutowej symulacji jazdy



Rysunek 21. Uśrednione wartości przyspieszeń dla trzech osi (X, Y, Z) dla prędkości obrotowej 175 obr./min w ciągu trwania minutowej symulacji jazdy



Rysunek 22. Uśrednione wartości przyspieszeń dla trzech osi (X, Y, Z) dla prędkości obrotowej 250 obr./min w ciągu trwania minutowej symulacji jazdy

5. Wnioski

Stanowisko do badań drgań w układzie niezależnego zawieszenia kół z wykorzystaniem sieci CAN zostało wykonane z myślą o zastosowaniu go w celach dydaktycznych. Dołożono wszelkich starań, aby komentarze oraz opisy na każdym etapie projektowania stanowiska były czytelne i zrozumiałe dla użytkownika mającego niewielką wiedzę w prezentowanej tematyce. Stanowisko zaprojektowano tak, że jest łatwa jego modyfikacja poprzez stosowanie ogólnodostępnych programatorów, bibliotek funkcji, urządzeń pomiarowych oraz udostępniając pierwowzory modeli 3D. Biorąc pod uwagę wstępne założenia projektu, wydawał się

on stosunkowo łatwy do wykonania. Jednak na etapie projektowania pojawiały się trudne zagadnienia związane z systemami sterowania oraz komunikacją. Były one wyzwaniem dla autora, co wynikało od niego zdobycia odpowiedniej wiedzy w tym zakresie. Po przestudiowaniu dostępnej literatury, osiągnięto zamierzone cele.

Na podstawie otrzymanych wyników w procesie badawczym oraz w odniesieniu do postawionych hipotez wyciągnięto następujące spostrzeżenia. Weryfikując pierwszą rozpatrywaną hipotezę twierdzącą, że jest możliwym przy pomocy modelu pojazdu RC o wysokiej skali dokładności zawieszenia odwzorować pracę prawdziwego zawieszenia w pojeździe osobowym odwołano się dwóch wymienionych wcześniej prac w rozdziale poświęconemu procesowi badawczemu. Wykorzystano fakt, że w obu wymienionych publikacjach rozpatrywano przejazd przez przeszkodę w postaci progu zwalniającego. Mimo starań, nie udało się autorowi pracy dać jasnej odpowiedzi na postawioną tezę. Wnioskować można, zatem że trudnym jest odniesienie pomiarów wykonanych na modelu RC w skali 1:10 do faktycznego pojazdu lub modelu specjalistycznego wykonanego z materiałów trwalszych i pewniejszych aniżeli plastik. Dodatkowym czynnikiem mający wpływ jest fakt, że pomiary dokonywano przy użyciu ogólnodostępnych czujników produkowanych hurtowo. Przekłada się to na dokładność i wiarygodność pomiaru. Należy pamiętać także, że porównywanie wyników pomiędzy pomiarami na obiektach rzeczywistych i ich pomniejszych modelach jest przedmiotem wielu prac i dotyczy np. wyznaczania odpowiednich współczynników przeliczeniowych.

Druga postawiona hipoteza poruszała zagadnienie wpływu prędkości poruszania się pojazdu po nierównościach na stan techniczny zawieszenia. Chcąc się odnieść do tej drugiej rozpatrywanej tezy warto przytoczyć fakt, że układ zawieszenia zbudowany jest w znacznej części z elementów sprężystych przy zastosowaniu różnych materiałów (guma, stal, materiały kompozytowe). Każdy z tych materiałów posiada stopień zużycia tj. stopień zmęczenia. Wraz z wzrostem prędkości wrasta częstość drgań w układzie zawieszenia, co przekłada się na szybsze zmęczenie materiału. W rezultacie może dojść do trwałego lub całkowitego uszkodzenia układu zawieszenia. Zaleca się, zatem pokonywanie przeszkód drogowych w postaci wybojów lub dziur z odpowiednio dobraną do tego manewru prędkością biorąc pod uwagę stopień załadowania pojazdu oraz jego stan techniczny. Argumentacja na podstawie wiedzy literaturowej wraz z pomiarami dowodzi tezy o wpływie prędkości przy pokonywaniu nierówności drogowych na stan zawieszenia pojazdu.

Reasumując stworzenie funkcjonalnego stanowiska dydaktycznego od podstaw wymaga szczegółowego zapoznania z każdym elementem wchodzącym w skład stanowiska. Zdobyta wiedza przy realizacji pracy pozwoliła na głębsze zapoznanie się z zasadą działania układu zawieszenia pojazdu wraz z jego budową oraz praktycznego sprawdzenia wiedzy zdobytej na zajęciach.

Autor ma nadzieję, że wykonane w ramach pracy stanowisko będzie przydatne w procesie dydaktycznym. Ważną cechą stanowiska, która nie była zbyt mocno podnoszona w niniejszym opracowaniu, jest możliwość testowania zachowania zawieszenia po zamontowaniu do niego elementów o różnym stopniu zużycia, lub wręcz całkowicie uszkodzonych. Takie porównania pozwolą studentom na naoczne przekonanie się jak istotny dla właściwej pracy zawieszenia jest stan poszczególnych jego elementów.

LITERATURA

1. BETZLER J., REIMPELL J.: Podwozia samochodów - Podstawy konstrukcji (wyd. 3). Warszawa 2004, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności sp. z o.o.
2. CZECH P., ŁAZARZ B., MALCZEWSKI B., WITASZEK K., WITASZEK M.: Drgania ogólne odczuwalne przez kierowcę samochodu osobowego podczas przejazdu przez progi zwalniające - cz. 2. TTS Technika Transport Szynowego, strony, 2015, Grudzień, 1026-1031.
3. DŁUGOSZ T., SIKORSKA A., WRÓBEL R.: Protokoły komunikacyjne w pojazdach samochodowych. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej 2013.
4. FERDEK U., ŁUCZKO J.: Analiza ćwiartkowego modelu zawieszenia pojazdu z tłumikiem hydraulicznym. Symulacja w Badaniach i Rozwoju, 2(2011)2, 67-74.
5. GABRYELEWICZ M.: Podwozia i nadwozia pojazdów samochodowych - część 2 (wyd. 1). Warszawa 2012, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności sp. z o.o.
6. GARDULSKI J.: Metody Badań Amortyzatorów Samochodów Osobowych. Diagnostyka, 3(2009)51, 93-100.
7. HAEMERS M., DERAMMELAERE S., IONESCU C.M., STOCKMAN K., DE VIAENE J., VERBELEN F.: Proportional-Integral State-Feedback Controller Optimization for a Full-Car Active Suspension Setup using a Genetic Algorithm. 3rd IFAC Conference on Advances in Proportional-Integral-Derivative Control PID (pp. 1-6). Ghent, Belgium: IFAC Papers On Line 51(2018)4.
8. NKOMO I.L., DOVE A., NGWAKO T.M., NYANDORO T.O.: Heaviside based optimal control for ride comfort and actuation energy optimisation in half-car suspension system. Control Conference Africa CCA 2017 (strony 259-264). Johannesburg: IFAC Papers On Line 50(2017)4.
9. P.P.H. WOBIT E.K.J. OBER s.c.: Teoria napędów krokowych. Pniewy: Wydanie własne 2007.
10. RABABAH M., BHUYAN A.: Passive Suspension Modelling and Analysis of a Full -Car Model. International Journal of Advanced Science and Engineering Technology 2013, 250-261.
11. RYCHTER T.: Budowa pojazdów samochodowych. Warszawa (1999), Wydawnictwo Szkole i Pedagogiczne.
12. Smart Software Solutions GmbH. Programowanie sterowników PLC w systemie CoDeSyS 2.3. Kempten : 3S – Smart Software Solutions GmbH 2006.
13. Wikipedia. (2020, Lipiec 26). Arduino IDE. Pobrano z lokalizacji Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Arduino_IDE