STANOWISKOWA SYMULACJA ODTWARZAJĄCA DYNAMIKI UKŁADU NAPĘDOWEGO SAMOCHODU Z AUTOMATYCZNĄ SKRZYNIĄ BIEGÓW – STEROWANIE I WYNIKI EKSPERYMENTÓW

GRZEGORZ ŚLASKI[1], JANUSZ WALKOWIAK[2]

Streszczenie

Do badania dynamiki układu napędowego samochodu z automatyczną skrzynią biegów autorzy zbudowali laboratoryjne stanowisko badawcze wyposażone w silnik z automatyczną skrzynią biegów i skonstruowany specjalnie dla tego stanowiska układ generowania momentu oporów ruchu. Układ ten wraz z przepustnicą są sterowane przez specjalnie opracowany sterownik pozwalający odtworzyć profil prędkości na stanowisku zgodnie z sygnałami z wcześniej wykonanych badań drogowych w postaci sygnału otwarcia przepustnicy oraz prędkości pojazdu. Sterownik ten jest więc integralną częścią stanowiska badawczego i dzięki swojej funkcjonalności pozwala znacząco zwiększyć możliwości badawcze oferując realizację powtarzalnych badań w warunkach dynamicznie zmiennych obciążeń jak i sterowań układu napędowego. Znacznie większe możliwości pomiarowe na stanowisku w porównaniu z badaniami drogowymi, pozwalają na uzyskanie większej liczby danych o badanym układzie napędowym. W artykule omówiono krótko budowę stanowiska, metodykę i podstawy sterowania symulacją. Opisano wykorzystanie narzędzi szybkiego prototypowania sterowników w procesie przygotowania oprogramowania sterownika symulacji. Przedstawiono także sposób zbierania i przygotowania danych do symulacji. Przedstawiono wyniki badań weryfikacyjnych oraz środowisko sterowania symulacją.

Słowa Kluczowe: dynamika pojazdów, automatyczna skrzynia biegów, symulacyjne badania stanowiskowe, symulacja odtwarzająca, prototypowanie sterowania elektronicznego

1. Wstęp – badania układów napędowych – metody i tendencje rozwojowe

Badania skrzyń biegów, a szerzej układów napędowych podzielić można, podobnie jak w przypadku innych podzespołów ogólnie na: funkcjonalne, badania wytrzymałości

[1] Politechnika Poznańska, Instytut Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych, ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań, e-mail: grzegorz@slaski.eu, tel.: 061 6652 222

[2] AUTO NAPRAWA Janusz Walkowiak, ul. Spławie 45A , 61-312 Poznań, e–mail: januszwalkowiak@neostrada.pl, tel.: 061 8798940

doraźnej oraz trwałościowe – w tym ostatnim przypadku często przyspieszone. Do ich prowadzenia wykorzystuje się specjalnie skonstruowane i zbudowane stanowiska badawcze. W pracy [6] przedstawiono klasyfikację stanowisk badawczych w aspekcie prowadzenia badań trwałościowych, które podzielono na badania prowadzone w warunkach obciążeń równoważnych, oraz w warunkach badań symulacyjnych na podstawie sygnałów wyjściowych lub wejściowych.

W pierwszym przypadku badany obiekt jest poddawany łatwym do zrealizowania na stanowisku obciążeniom zastępczym, będącym wynikiem przekształcenia widma losowych obciążeń eksploatacyjnych na równoważny, w sensie wytężeniowym, blok obciążeń zdeterminowanych. Wyznaczenie obciążeń zastępczych wymaga zbadania rzeczywistych stanów obciążeń, następnie takiego ich przetworzenia by mimo zmiany ich charakteru powodowały takie same skutki trwałościowe i zmęczeniowe. Ten sposób prowadzenia badań nie nadaje się jednak do prowadzenia badań funkcjonalnych nad układem sterowania skrzynią biegów jaki jest jednym z istotniejszych podukładów automatycznej skrzyni biegów.

Drugi przypadek to badania symulacyjne na podstawie sygnałów wyjściowych lub wejściowych. W pierwszym wariancie – symulacji na podstawie sygnałów wyjściowych – najczęściej realizuje się wielostopniowe programy blokowe. Dla realizacji tych badań stanowiska wyposażone są w programatory pracujące w układzie sprzężenia zwrotnego dla korygowania warunków pracy stanowiska w razie wystąpienia rozbieżności pomiędzy wartością zadaną, a rzeczywistą w danej chwili. Stanowiska wykorzystują do napędu badanych skrzyń silniki elektryczne i sterowane hamulce o małych momentach bezwładności. Symulacja ta w pewnym stopniu odpowiada omawianej w niniejszym artykule symulacji odtwarzającej, z tą różnicą, że odtwarzane są stałe poziomy obciążeń zmieniające się skokowo podczas realizacji kolejnych bloków obciążeń. W drugim wariancie – symulacji na podstawie sygnałów wejściowych – stosuje się stanowiska bezwładnościowe. Symulacja taka ma charakter symulacji prognostycznej, podczas której na stanowisku symuluje się odpowiedź dynamiki układu napędowego lub symulatora oporów ruchu pojazdu na zadane wymuszenie w zakresie sterowania układem napędowym (przepustnica, zmiana biegów, itd.). Na stanowiskach takich odwzorowuje się warunki zabudowy skrzyni biegów w pojeździe oraz właściwości dynamiczne układu przeniesienia napędu.

Pomimo, iż w krajowych publikacjach w ostatnich latach temat badań układów napędowych nie pojawia się zbyt często to warto wspomnieć, że zagadnienia te były poruszane w kilku pracach [4, 6, 7, 8, 9] w różnym zakresie – najczęściej omawiając badania do których wykorzystano omówione wyżej metody i odpowiednie stanowiska, a w mniejszym stopniu omawiając samą metodykę prowadzenia badań czy też sterowania stanowiskami.

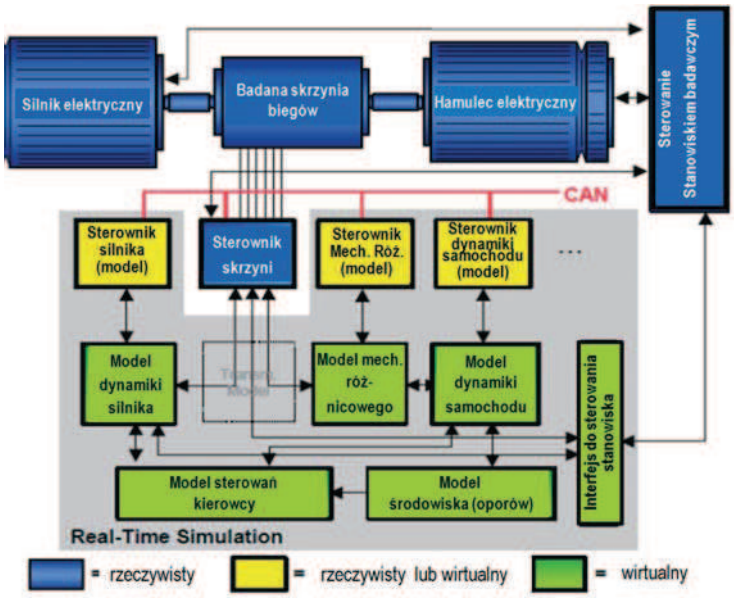
Nowym trendem w badaniach stanowiskowych jest wykorzystanie technik szybkiego prototypowania sterowników (*Rapid Control Prototyping* – RCP) i symulacji ze sprzętowym sprzężeniem zwrotnym (*Hardware In the Loop simulation* – HIL) w połączeniu z dotychczas stosowanymi stanowiskami, co znacząco zwiększa ich możliwości, a czasami ułatwia także konstrukcję.

W pracy [1] przedstawiono zagadnienie badania fizycznego obiektu z wykorzystaniem

symulacji HIL realizowanej w czasie rzeczywistym dla uzyskania symulacji otoczenia, w którym pracuje badany obiekt. Zwrócono uwagę na fakt coraz trudniejszej kalibracji sterowników silników i w zasadzie konieczność uwzględniania w ich tworzeniu wszelkich innych współpracujących zespołów i układów. Jedną z metod ułatwienia tego zadania, a jednocześnie zmniejszenia kosztów jego realizacji jest proponowana metoda wykorzystania symulacji w czasie rzeczywistym (*Real Time Simulation*). Zastosowanie tej symulacji pozwala na realizację na hamowni silnikowej części badań do tej pory realizowanych na hamowniach podwoziowych – a więc wymagających zabudowy badanego układu w pojeździe.

W ramach symulacji HIL symulowane mogą być sygnały obciążeń dynamicznych silnika, podukładów lub całego układu napędowego, a nawet całego pojazdu. W zakresie symulacji obciążeń układu napędowego w pracy [3] przedstawiono możliwość symulowania różnych znormalizowanych cykli jezdnych, dynamiki pojazdu i układu napędowego oraz modelu kierowcy.

Podobne zastosowanie połączenia symulacji komputerowej ze sprzętowym sprzężeniem zwrotnym z badaniem rzeczywistego elementu układu napędowego przedstawiono w pracy [13]. Opisano tu głównie wykorzystanie symulacji HIL do badania układów sterowania elektronicznego w samochodach, a także skrzyń biegów z wykorzystaniem symulacji dynamiki pojazdu i zewnętrznego środowiska oraz z dodatkowym wykorzystaniem modelowania silnika spalinowego. Schematy jednego z możliwych wariantów prowadzenia symulacji przedstawiono na rys.1.



Rys. 1. Schemat badań z wykorzystaniem symulacji w czasie rzeczywistym z symulacją pracy silnika spalinowego układu przeniesienia napędu (na podstawie[13]).

W przytoczonych publikacjach jak i wielu innych na ogół nie omawia się szczegółowo algorytmów sterowania stanowiskami dynamicznymi wykorzystującymi symulację w czasie rzeczywistym. Opis taki zamieszczony jest natomiast w pracy [5]. Autorzy przedstawiają zarówno aspekty sprzętowe, jak i dotyczące modelowania i oprogramowania dynamicznego stanowiska do modelowania sumarycznych sił oporów ruchu samochodu. Po stronie sprzętowej stanowiska znalazły się poza badanym silnikiem i skrzynią biegów dodatkowa skrzynia przekładniowa, czujnik momentu, hamulec elektrowirowy oraz układ mas wirujących. W zakresie oprogramowania omówiono modelowanie sił oporów ruchu w sensie prognostycznym (na bazie modelu pojazdu) oraz zastosowane technologie informatyczne – program napisano używając Microsoft Visual C++ i wykorzystano do komunikacji podzespołów na stanowisku magistralę CAN.

W niniejszej pracy zaprezentowano realizację stanowiska badawczego, w którym wykorzystano symulację w czasie rzeczywistym zastosowaną w procesie szybkiego prototypowania sterownika stanowiska do realizacji dwóch możliwych wariantów symulacji w dziedzinie czasu – prognostycznej i odtwarzającej. W przypadku symulacji odtwarzającej celem jest odtworzenie przebiegu obciążeń układu napędowego poprzez odtworzenie wierne w czasie profilu prędkości samochodu z próby drogowej przy zadaniu zgodnego z próbą drogową kąta otwarcia przepustnicy. W artykule opisano budowę i sposób sterowania stanowiskiem a także sposób wykorzystania narzędzi i metody szybkiego prototypowania sterowników połączonej, z punktu widzenia testowania sterownika automatycznej skrzyni biegów, z metodą symulacji ze sprzętowym sprzężeniem zwrotnym (HIL).

2. Koncepcja prowadzenia symulacji i budowa stanowiska

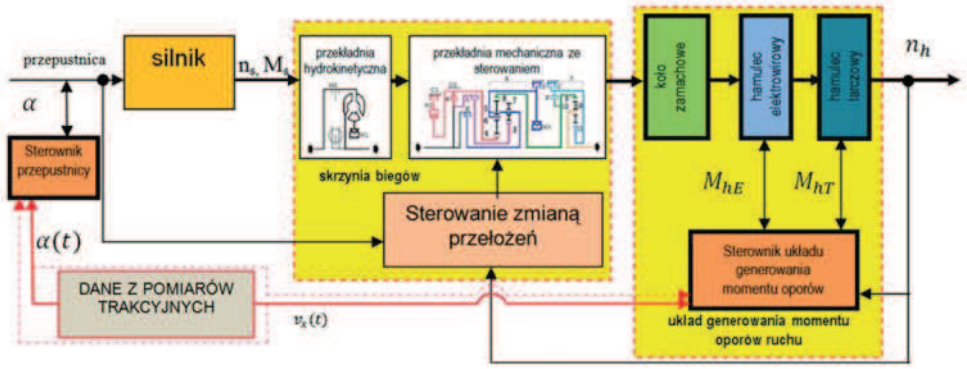
Celem prac badawczych i konstrukcyjnych podjętych przez autorów było opracowanie stanowiska badawczego umożliwiającego prowadzenie, w warunkach laboratoryjnych, symulacji pracy układu napędowego samochodu osobowego z automatyczną skrzynią biegów w trybie symulacji odtwarzającej oraz symulacji prognostycznej.

W pierwszym przypadku założono prowadzenie symulacji na bazie danych zebranych podczas rzeczywistej eksploatacji pojazdu, a dotyczących dwóch parametrów – stopnia otwarcia przepustnicy silnika oraz prędkości obrotowej wału napędowego (zależnej w większości warunków badań liniowo od prędkości wzdłużnej samochodu). Układ sterujący stanowiska regulując kąt otwarcie przepustnicy silnika na stanowisku (w oparciu o zebrane dane), jednocześnie steruje poziomem momentu oporów ruchu obciążającego układ napędowy tak, aby w efekcie uzyskać zgodność z zapisanym w trakcie badań przebiegiem zmian prędkość obrotowej wału napędowego.

W symulacji prognostycznej, zadanie polega na uzyskaniu możliwości zadawania dowolnego przebiegu zmian otwarcia przepustnicy i automatycznym generowaniu momentu oporów ruchu adekwatnie do przyjętych arbitralnie parametrów drogi i czynników wpływających na opory ruchu pojazdu (opory wzniesienia, toczenia i powietrza).

Ze względu na założenie możliwości realizacji symulacji dla obu przypadków budowa stanowiska jest połączeniem koncepcji stanowisk przeznaczonych do symulacji na podstawie

sygnałów wyjściowych oraz wejściowych. Z punktu widzenia symulacji na podstawie sygnałów wejściowych stanowisko zapewnia zabudowę układu napędowego i fizyczne odwzorowanie bezwładności samochodu przy pomocy koła zamachowego o odpowiednio dobranym zredukowanym do osi wału napędowego momencie bezwładności.



Rys. 2. Schemat sterowania pracą stanowiska dla potrzeb symulacji odtwarzającej.

Z kolei dla odtwarzania sygnałów wyjściowych – prędkości pojazdu – stanowisko posiada zestaw sterowanych hamulców pozwalających regulować moment oporów ruchu tak, aby uzyskać w wyniku jego odpowiedniej wartości zgodność zmian prędkości pojazdu w czasie adekwatnie do zapisanych prób drogowych. W przypadku symulacji prognostycznej możliwa jest zmiana w czasie poziomu momentu oporów ruchu na podstawie zaprogramowanego przebiegu zmian oporów ruchu (zmienny współczynnik oporów toczenia, zmienne nachylenie drogi, zmiana oporów powietrza wraz ze zmianą prędkości). W celu generowania sygnału aktualnej wartości oporów ruchu wykorzystywana jest symulacja ich wartości zależna od aktualnej prędkości i zadeklarowanych zmian nachylenia drogi synchronizowanych ze zmianami przebytego przez symulowany pojazd odcinka drogi.

W efekcie przyjęcia tej koncepcji dla obu wariantów symulacji wykorzystano ten sam układ wykonawczy generowania momentu oporów ruchu jednak sterowany według innego programu sterującego.

Funkcjonalność stanowiska jest uzyskiwana po zintegrowaniu następujących podukładów funkcjonalnych:

a) obiekt badany:
- silnik,
- automatyczna skrzynia biegów,

b) zespół generowania momentu oporów ruchu:
- koło zamachowe,
- hamulec elektrowirowy,
- hamulec tarczowy,

c) układ sterowania – część sprzętowa:
- komputer czasu rzeczywistego (prototypowy sterownik),
- zespół czujników elektronicznych,
- zespół układów wykonawczych (nastawników) sterowanych sygnałami elektrycznymi – w tym obwód pneumatyczny i hydrauliczny,
- zespół sterująco-pomiarowy dla obsługi manualnej układów stanowiska,

d) układ sterowania – część programowa realizowana przez prototypowy sterownik:
- program sterujący symulacją,
- wirtualny panel sterująco-pomiarowy,

e) układy bezpieczeństwa
- elektro-mechaniczny układ zabezpieczenia maksymalnych obrotów koła zamachowego stanowiska,
- układy zabezpieczeń dla zmiany trybów pracy skrzyni biegów.

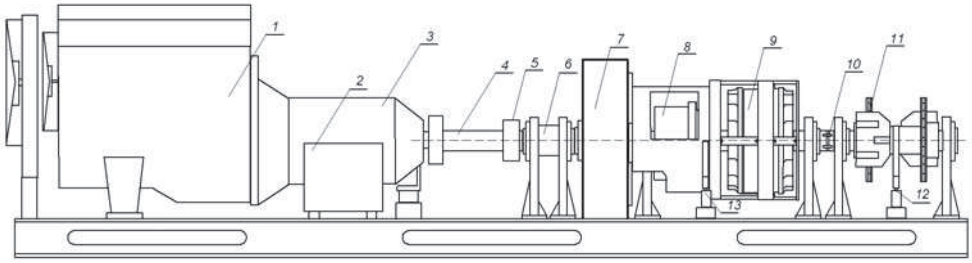
Wymienione podukłady, wśród których elementy informatyczne oraz elektroniczne stanowią integralne i istotne elementy stanowiska, powodują, że całe stanowisko staje się systemem mechatronicznym, w którym wspomniane układy wraz z układem mechanicznym tworzą razem integralną całość.

Głównym podukładem stanowiska jest układ mechaniczny, który realizuje podstawowy proces generowania momentu oporów ruchu i obciążania nim badanego układu napędowego z silnikiem. Schemat budowy tej części stanowiska przedstawiono na rys. 3.

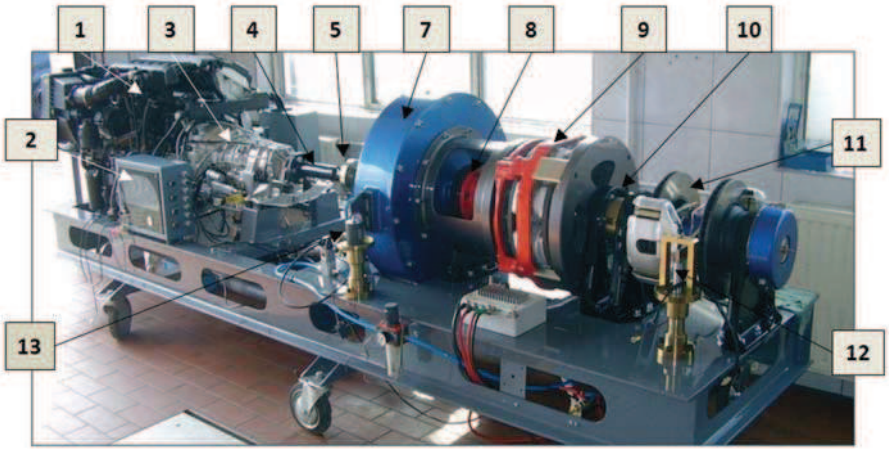
Zastosowane na stanowisku koło zamachowe symuluje opory bezwładności, a hamulce cierne i hamulec elektrowirowy generują pozostałe opory ruchu zgodnie z sygnałami sterującymi obliczonymi w czasie rzeczywistym przez układ sterowania. Stanowisko sterowane jest tak, że przez większość czasu pracy moment oporów generuje hamulec elektrowirowy. Ze względu na swoją charakterystykę (spadek momentu przy małych prędkościach, niemożność wytworzenia momentu przy zerowej prędkości) nie zapewnia on odpowiedniego momentu hamującego w całym zakresie symulacji. Dlatego konieczne też jest wykorzystanie hamulców ciernych, które uzupełniają moment generowany przez hamulec elektrowirowy w przypadku, gdy wymagane opory przekroczą możliwości tego hamulca. Ma to miejsce w dwóch przypadkach:
- przy niewielkich prędkościach (jazda z prędkościami poniżej 4 km/h) i podczas postoju pojazdu, podczas którego hamulce cierne muszą pokonać moment wleczenia powstający na skutek pracy przekładni hydrokinetycznej w automatycznej skrzyni biegów,
- w czasie odtwarzania procesu hamowania z opóźnieniem większym niż 0,3 g.

Ponieważ dopuszczalna prędkość obrotowa hamulca elektrowirowego i hamulca ciernego są ograniczone zastosowano reduktor w postaci przekładni planetarnej o przełożeniu ir=2,72.

a)



b)



Rys. 3. Schemat budowy (a) i widok (b) stanowiska badawczego: 1 – silnik, 2 – panel kontrolny, 3 – automatyczna skrzynia biegów, 4 – wał napędowy, 5 – momentomierz na wale, 6 – sprzęgło tulejowe (lub elastyczne), 7 – masa wirująca wraz z obudową, 8 – reduktor, 9 – hamulec elektrowirowy, 10 – sprzęgło przeciążeniowe, 11 – zespół hamulców ciernych, 12 – czujnik momentu hamulców ciernych, 13 – czujnik momentu hamulca elektrowirowego.

3. Koncepcja i struktura programu sterowania symulacją odtwarzającą

Zgodnie z rys. 2 oraz rys. 4 sygnałami na podstawie, których realizowana jest symulacja odtwarzająca są dwa sygnały zarejestrowane podczas prób drogowych wykonanych samochodem wyposażonym w układ napędowy identyczny z badanym:

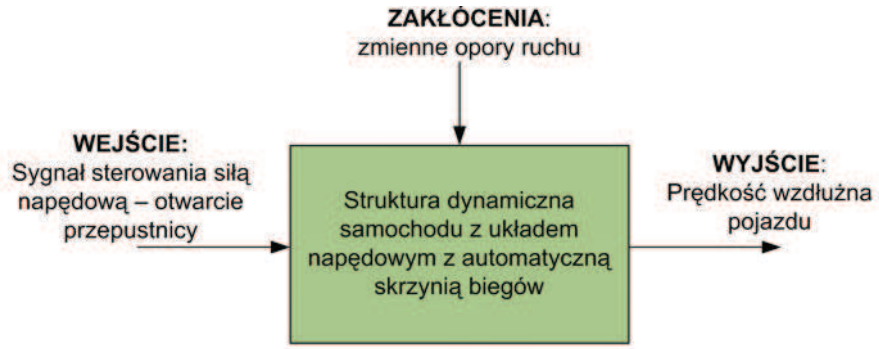
- stopień otwarcia przepustnicy (zarejestrowany jako sygnał analogowy),
- prędkość wzdłużna samochodu (zarejestrowana jako sygnał analogowy).

Przykład takich sygnałów dla jednej z prób drogowych pokazano na rysunku 5. Pierwszy

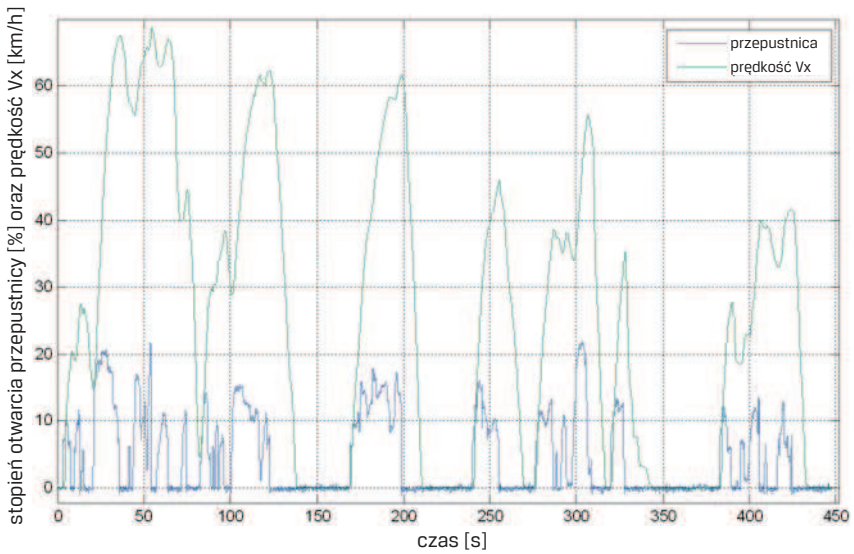
z sygnałów jest sygnałem zadanym przez kierowcę w celu uzyskania pożądanej przez niego dynamiki zmian prędkości samochodu. Drugi jest w istocie uzyskanym efektem – przebiegiem prędkości samochodu czasie.

Tym co decyduje o wartości uzyskanej dynamiki zmian prędkości są dwa elementy:

- charakterystyka własności trakcyjnych samochodu – własności układu napędowego, masa samochodu, itd.
- zmienne zewnętrzne opory ruchu samochodu w postaci zmiennych oporów powietrza i wzniesienia.



Rys. 4 Schemat struktury sygnałów działających na badany układ napędowy.



Rys. 5. Zestaw sygnałów przygotowanych do symulacji odtwarzającej.

W przypadku charakterystyki własności trakcyjnych samochód – na stanowisku badawczym mamy do czynienia z niemal wiernym odwzorowaniem charakterystyki układu napędowego i zastępczym odwzorowaniem własności masowych samochodu poprzez zastosowane koło zamachowe oraz elementy wirujące hamulców i reduktora.

W przypadku drugiego elementu – zmiennych oporów ruchu – nie jest możliwe w prosty sposób ich zdefiniowanie dla odtworzenia na stanowisku. Przyjęto koncepcję zakładającą, że jeżeli ich wartość zostanie wyregulowana na takim poziomie, że prędkość pojazdu podczas badania symulacyjnego będzie równa prędkości w trakcie badań drogowych to można założyć z pewnym przybliżeniem, że wysterowany poziom momentu oporu będzie odpowiadał poziomowi momentu oporów ruchu jaki istniał podczas realizacji badań drogowych. Jest to oczywiście pewne przybliżenie zakładające, że moc silnika, własności skrzyni biegów (włącznie z programem sterującym) jak i poziom odwzorowania otwarcia przepustnicy będą idealnie zgodne z warunkami badań drogowych.

Dlatego celem sterowania w przypadku symulacji odtwarzającej jest regulacja prędkości obrotowej koła zamachowego (odpowiadającej prędkości wału napędowego podczas jazd drogowych) tak, aby odpowiadała prędkości zarejestrowanej podczas badań drogowych przy założeniu odtworzenia zmienności stopnia otwarcia przepustnicy również zgodnie z wynikiem z badań drogowych.

Powyższa koncepcja narzuca w strukturze programu sterującego dwa niezależne sterowniki:
- regulujący stopień otwarcia przepustnicy,
- regulujący prędkość obrotową koła zamachowego.

Sterownik przepustnicy ma za zadanie taką regulację pracy serwomechanizmu sterowania przepustnicą (nastawnika przepustnicy), aby uzyskać jak najmniejszy błąd w odtworzeniu stopnia otwarcia przepustnicy na stanowisku w danej chwili czasu w stosunku do otwarcia zarejestrowanego dla tego czasu w badaniach drogowych samochodu.

Drugi sterownik – układu generowania oporów ruchu – realizuje regulację prędkości obrotowej koła zamachowego, która powinna w jak najlepszym stopniu odpowiadać prędkości samochodu podczas badań, przeliczonej do prędkości wału napędowego. W drugim przypadku ze względu na zastosowanie w układzie generowania momentu oporów ruchu dwóch hamulców sterowanie jest bardziej złożone – wymaga odpowiedniego rozdziału momentu oporów na dwa hamulce. Oba zadania są jednak realizowane z wykorzystaniem sterowania z uwzględnieniem regulacji w pętli sprzężenia zwrotnego regulatorów PID z różnymi modyfikacjami (nieliniowościami).

Najbardziej ogólny schemat sterowania pracą stanowiska dla potrzeb symulacji odtwarzającej przedstawiono na rys. 2. Jest to forma uproszczona (bez szczegółów) pozwalająca skupić się na kluczowych procesach i sygnałach dla realizacji symulacji odtwarzającej.

W rzeczywistości ze względu na szereg współpracujących podzespołów, ograniczenia ich charakterystyk a także związane z tym ograniczenia efektywności wykorzystania w obu sterownikach regulatorów PID rzeczywiste rozwiązania przestawionego procesu sterowania są o wiele bardziej rozbudowane – omówiono je w dalszej części artykułu.

Warto zwrócić uwagę na konieczność zastosowania dodatkowego elementu w stosunku do regulacji stałowartościowej, a mianowicie bloku podawania zmieniających się w funkcji czasu symulacji wartości zmierzonych podczas badań drogowych – wartości te muszą być podawane w czasie rzeczywistym zgodnym z aktualnym czasem symulacji, jako nowe wartości zadane dla sterownika przepustnicy oraz sterownika układu generowania oporów ruchu.

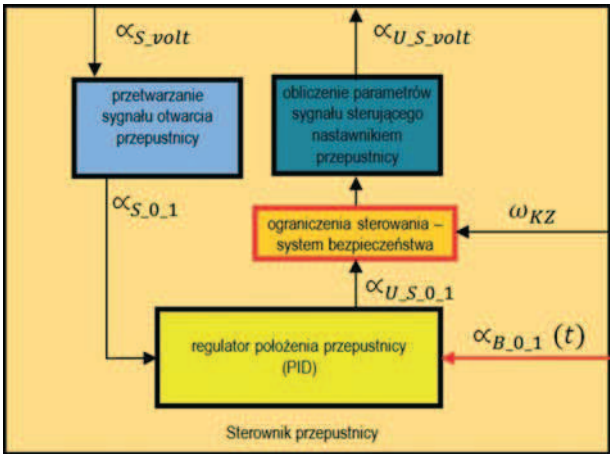
3.1. Sterownik przepustnicy

Dla sterownika przepustnicy sygnałem sprzężenia jest rzeczywisty kąt otwarcia przepustnicy mierzony na stanowisku, porównywany z sygnałem zadanym w postaci kąta otwarcia zarejestrowanego podczas badań drogowych w samochodzie (kąt został wyrażony w postaci stopnia otwarcia zmieniającego się od 0 do 1).

Sterownik ten realizuje dwa zadania:

- podstawowe – związane z realizacją symulacji odtwarzającej – reguluje chwilowe otwarcie przepustnicy tak aby uzyskać jego zgodność z sygnałem zadanym jakim jest sygnał otwarcia przepustnicy zarejestrowany podczas badań drogowych samochodu,
- dodatkowe – modyfikuje sterowanie wynikające z realizacji symulacji odtwarzającej wynikające z ewentualnego wystąpienia warunków zapewnienia bezpieczeństwa – np. przekroczenia maksymalnej bezpiecznej prędkości kątowej wału koła zamachowego.

Sam proces regulacji położenia przepustnicy oparty został o regulator proporcjonalno-całkująco-różniczkujący (PID), dla którego w procesie szybkiego prototypowania sterowników dobrano parametry wzmocnień poszczególnych członów. Dodatkowo zastosowano możliwość kompensacji bezwładności serwomechanizmu poprzez wyprzedzenie informacji o stopniu otwarcia przepustnicy podawanej do sterownika. W strukturze sterownika wyróżnić można trzy podstawowe bloki związane z regulacją i jeden dodatkowy związany z realizacją funkcji bezpieczeństwa (rys. 6).



Rys. 6. Struktura sterownika przepustnicy.

Bloki związane z regulacją realizują następujące funkcje:

- przetwarzanie analogowego sygnału napięciowego do postaci znormalizowanej w zakresie wartości liczbowych od 0 do 1 mieszczących się pomiędzy stanem zamknięcia i maksymalnego otwarcia przepustnicy,
- regulacja PID z dodatkowymi ograniczeniami pracy regulatora dla końcowych zakresów pracy nastawnika przepustnicy ograniczonych mechanicznie, dla których praca regulatora PID jest nieskuteczna i realizowana jest wg innych algorytmów,
- formowanie sygnału sterującego nastawnikiem przepustnicy na podstawie znormalizowanego cyfrowego sygnału otwarcia generowanego przez regulator, blok ten dostosowuje sygnał sterujący do parametrów nastawnika.

3.2. Sterownik układu generowania oporów ruchu

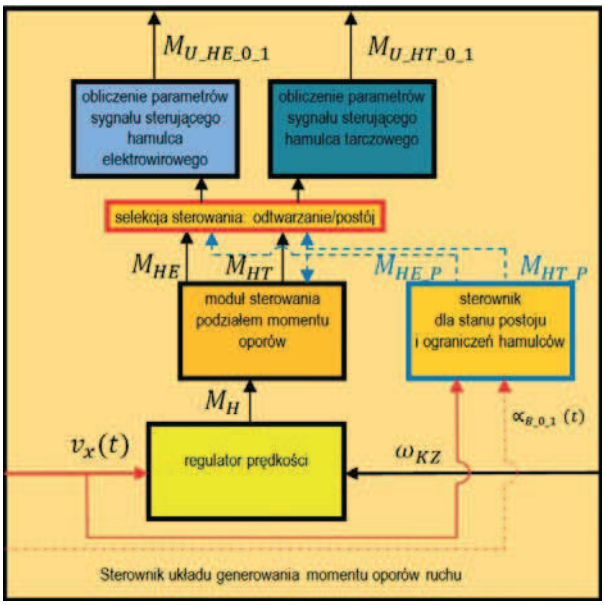
Sterownik układu generowania oporów ruchu pracuje w pętli sprzężenia zwrotnego wykorzystując sygnał prędkości obrotowej wału koła zamachowego i przeliczonej do wału napędowego prędkości samochodu zarejestrowanej podczas badań drogowych. Zadaniem tego sterownika jest takie sterowanie momentem oporów ruchu, aby różnica między prędkością kątową koła zamachowego dla danego kroku czasowego symulacji a odpowiadającą temu krokowi czasowemu prędkością zmierzoną w trakcie badań drogowych była jak najmniejsza.

Dodatkowo, ze względu na strukturę układu generowania momentu oporów ruchu składającego się z dwóch różnego typu hamulców, sterownik musi w odpowiedni sposób wykorzystywać możliwości generowania momentu przez oba hamulce. Ich dobór podczas konstruowania stanowiska wynikał z komplementarności ich funkcjonalności w stosunku do zakładanego zapotrzebowania na moment hamujący.

Ogólny schemat sterownika układu generowania momentu oporów ruchu przestawia rys. 7 a przykład uzyskanych wartości momentu hamowania dla procesu odtwarzania na rys. 8.

Widoczne są na tym schemacie następujące bloki:

- regulator prędkości – jest podstawowym regulatorem procesu odtwarzania prędkości jazdy na stanowisku badawczym, wykorzystującym głównie hamulec elektrowirowy; działa wykorzystując regulator PID z ograniczeniami dla stanu ujemnego uchybu (prędkość stanowiska mniejsza od prędkości z badań drogowych) co jest związane z brakiem możliwości dodatkowego napędzania koła zamachowego,
- moduł sterowania podziałem generowania momentu oporów – moduł odpowiedzialny za podział zadania generowania momentu oporów ruchu na dwa hamulce – elektrowirowy i cierny – uwzględnia ograniczenia hamulców,
- sterownik dla stanu postoju i uwzględnienia ograniczeń hamulców – sterownik którego zadaniem jest realizacja sterowania hamulcami w pętli otwartej (bez sprzężenia zwrotnego) dla dwóch stanów pracy stanowiska – zatrzymania pojazdu oraz hamowania z opóźnieniem większym niż 0,3 g,
- moduł selekcji sterowania pomiędzy fazami odtwarzanie prędkości/postój – zadaniem



Rys. 7. Struktura sterownika układu generowania momentu oporów ruchu.

tego modułu jest wybór źródła sygnału sterującego podawanego na bloki formowania sygnałów sterujących hamulców po wykryciu stanów dla których konieczna jest zamiana sterowania w pętli sprzężenia zwrotnego na sterowanie otwarte lub dodatkowe wykorzystanie hamulca tarczowego,

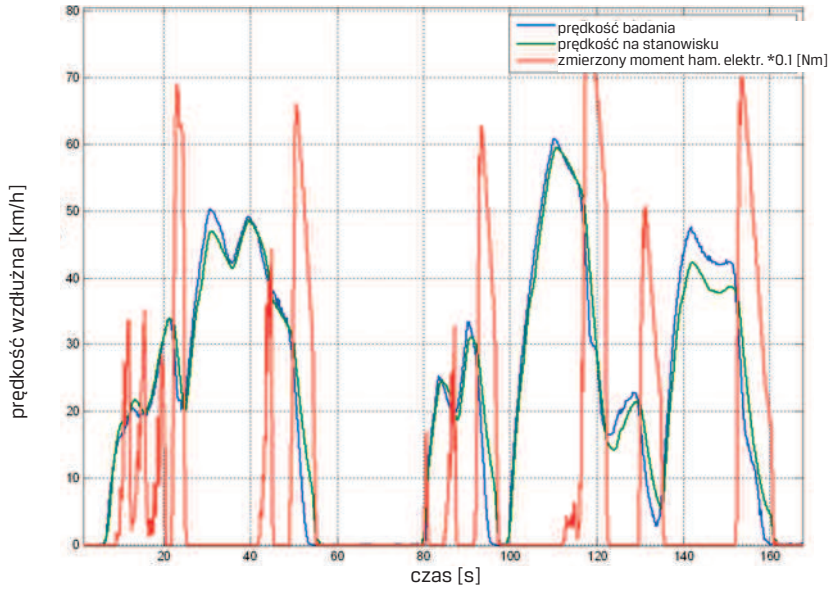
- moduł formowania sygnału sterującego hamulca elektrowirowego – generuje sygnał typu PWM (Puls Width Modulation) – o regulowanej szerokości impulsu dla sterowania hamulcem elektrowirowym na podstawie znormalizowanego sygnału generowanego przez sterownik,
- moduł formowania sygnału sterującego hamulca tarczowego – generuje sygnał analogowy sterowania układem nastawnika hamulca tarczowego (wykorzystywane jest sterowanie siłownikiem pneumatycznym obsługującym hydrauliczną pompę hamulcową) na podstawie znormalizowanego sygnału generowanego przez sterownik.

Hamulec elektrowirowy jest hamulcem o dynamice sterowania na tyle szybkiej, że pozwoliło to na wykorzystanie go bezpośrednio w pętli sprzężenia zwrotnego dla regulacji prędkości i realizację sterowania z wykorzystaniem regulatora PID. Regulator ten uzupełniono o dodatkowe ograniczenia pracy wynikające z faktu istnienia takich stanów pracy, w których niemożliwe jest osiągniecie uchybu regulacji równego zeru przy jednoczesnym wyczerpaniu możliwości dalszego zwiększania generowanej wartości momentu oporów ruchu. Taka sytuacja powoduje narastanie uchybu co prowadzi w konsekwencji do dużych opóźnień w procesie regulacji i jej dużą niedokładność.

Parametry wzmocnień poszczególnych członów regulatora PID dobrano w procesie szybkiego prototypowania sterowników (RCP).

Hamulec tarczowy ze względu na duże opóźnienie odpowiedzi na zadawane sterowanie, wynikające z rozbudowanego układu nastawnika, wymusił realizację sterowania w pętli otwartej w oparciu o dwa sposoby sterowania zależne od sytuacji wymagających wykorzystania tego hamulca:

- dla symulacji procesu hamowania samochodu z opóźnieniem większym od 3 m/s^2 (maksymalne możliwe do uzyskania z wykorzystaniem jedynie hamulca elektrowirowego) sterowanie odbywa się na podstawie prognozy wymaganego opóźnienia, opartej o sygnał prędkości z badań drogowych z dodatkowym ustalonym na podstawie dynamiki układu sterowania hamulcem tarczowym wyprzedzeniem; wartość opóźnienia hamowania przeliczana jest na poziom nastawy sterowania hamulcem tarczowym z pewnym niedoszacowaniem uzupełnianym hamulcem elektrowirowym, umożliwiającym dokładne sterowanie momentem ,
- dla realizacji procesu zatrzymania ruchu obrotowego koła zamachowego sterowanie realizowane jest wg zaprogramowanego przebiegu płynnego narastania momentu hamującego do zatrzymania i utrzymywania tego stanu do wystąpienia warunków w sygnałach z badań drogowych odpowiadających rozpoczęciu procesu ruszania samochodu.

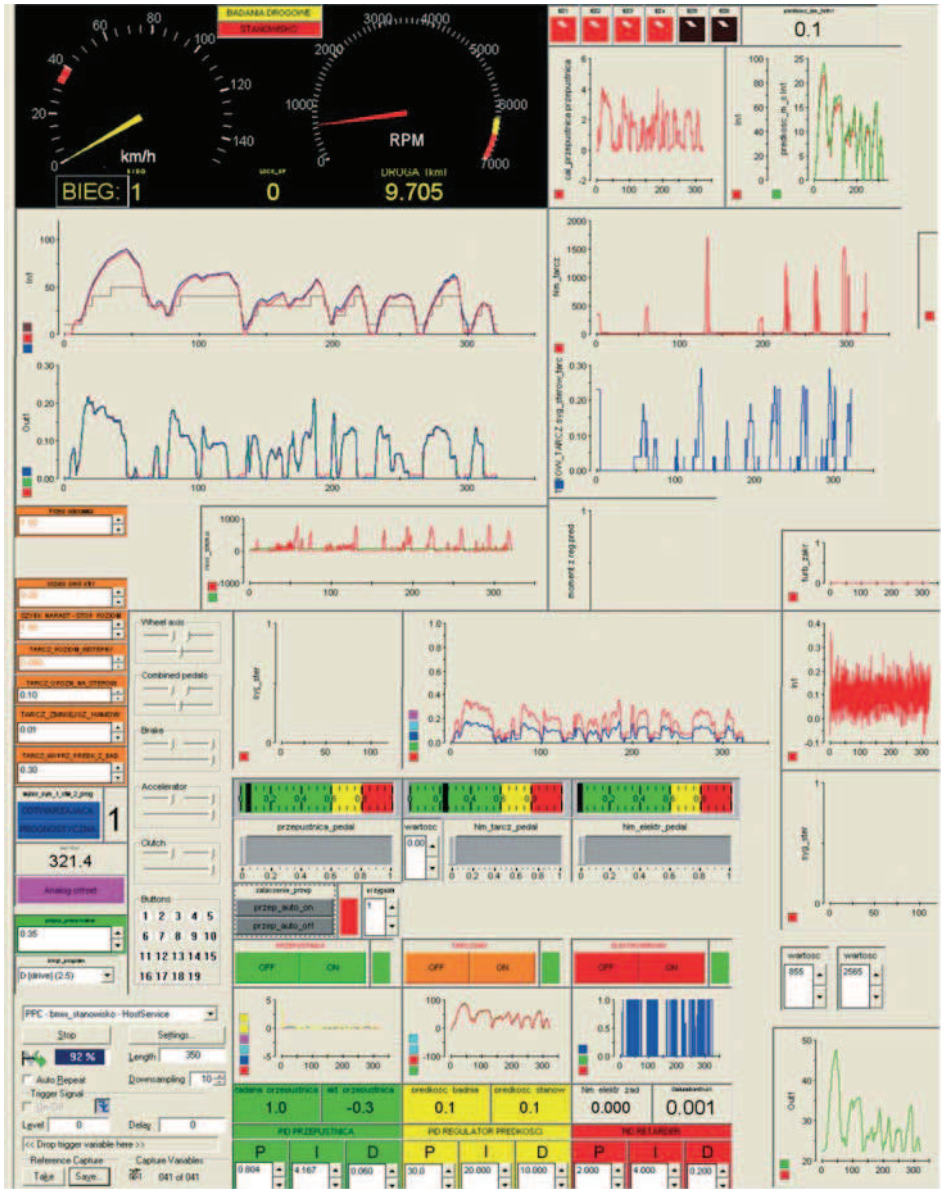


Rys. 8. Wynik regulacji momentu hamulca elektrowirowego.

4. Implementacja sterownika

Do implementacji programu sterującego w rzeczywistym sterowniku wykorzystano metodę i narzędzia szybkiego prototypowania sterowników (Rapid Control Prototyping). Było to podyktowane dużą złożonością układu sterowania i badawczym charakterem stanowiska, a także możliwością znacznego przyspieszenia czasu realizacji sterowania stanowiskiem.

Istotą zastosowanej metody szybkiego prototypowania z wykorzystaniem oprogramowania MATLAB Simulink jest automatyczna implementacja programu sterowania zapisanego w postaci schematu blokowego do pracy w czasie rzeczywistym na wybranej platformie sprzętowej.



Rys. 9. Widok wirtualnego panelu sterująco-pomiarowego zrealizowanego w programie ControlDesk.

Oprogramowanie to wraz z odpowiednimi narzędziami pozwala na modelowanie obiektów sterowania i projektowanych regulatorów (sterowników). Następnie możliwe jest wykonanie jego kompilacji do postaci wykonywalnej na platformie sprzętowej składającej się z komputera czasu rzeczywistego współpracującego z kartami wejść/wyjść dla sygnałów mierzonych i sterujących. Zaletą tej metody oraz wykorzystywanych narzędzi jest także to, że podczas prób sterownika możliwy jest dostęp do podglądu w czasie rzeczywistym a także zapis wszelkich zmiennych z jakich korzysta projektowany sterownik. Pozwala to na kontrolę poprawności realizacji założonych funkcji oraz na zrozumienie pojawiających się ewentualnych błędów.

W przypadku systemu dSpace kontrolę nad procesem prototypowania sterownika umożliwia oprogramowanie ControlDesk pozwalające tworzyć dowolne środowiska graficzne sterowania i analizy mierzonych sygnałów w postaci wirtualnych paneli sterowniczych (rys. 9). Daje ono oprócz możliwości zapisu przebiegów czasowych wszelkich sygnałów wykorzystywanych w sterowniku możliwość zmiany w trakcie symulacji (sterowania) wielu parametrów projektowanego sterownika.

4.1. Przygotowanie danych do odtwarzającej symulacji stanowiskowej

W trakcie przygotowania danych do realizacji stanowiskowej symulacji odtwarzającej konieczne jest zarejestrowanie podczas przejazdu w warunkach drogowych dwóch sygnałów – prędkości samochodu (względnie prędkości obrotowej elementu układu napędowego) oraz stopnia otwarcia przepustnicy. Autorzy wykorzystali zastosowany seryjnie w samochodzie czujnik otwarcia przepustnicy oraz odbiornik GPS o częstotliwości sygnału prędkości 5 Hz.

Ze względu na znaczący w ostatnim okresie postęp w zakresie wykorzystania tanich metod pomiaru, często bazujących na już obecnych w pojazdach czujnikach, uzyskanie danych wykorzystywanych do symulacji odtwarzającej może być jeszcze prostsze. Może to być np. skorzystanie z możliwości odczytu danych z systemu diagnostyki pokładowej (OBD), czy wykorzystanie rozwiązań takich jak systemy łączące odczyt z systemu OBD z pomiarem GPS [2].

Sygnały wzorcowe dla symulacji muszą posiadać następująco postać:
- sygnał otwarcia przepustnicy – wartości od 0 do 100%,
- prędkość wzdłużna samochodu – wartości w km/h (ze względu na ograniczenia stanowiska wartość od 0 do 155 km/h).

Ponadto, ze względu na możliwe błędy pomiarowe, konieczna może być realizacja dodatkowych procesów podczas przygotowywania danych pomiarowych na potrzeby symulacji odtwarzającej:
- usunięcie błędu stałej wartości dodanej do sygnału (brak kalibracji zera) – proces ten nazywany jest usuwaniem „offsetu",
- usunięcie szumu z sygnału – wynikające z niedostatecznej jakości czujnika lub toru pomiarowego lub obu elementów łącznie – można to zrealizować przy pomocy filtracji sygnału – najczęściej dolnoprzepustowej,

- uśrednienie przy pomocy tzw. średniej ruchomej sygnału o długim czasie próbkowania – dotyczy sygnałów z GPS lub czujnika impulsowego pracujących z częstotliwością 5 Hz – ze względu na dynamikę stosunkowo dużej masy jaką jest samochód z dużym prawdopodobieństwem można założyć że wszelkie zmiany prędkości wzdłużnej samochodu mają płynny charakter,
- przy wykorzystaniu sygnału z prędkości obrotowej wału konieczne jest przeliczenie jej do prędkości wzdłużnej samochodu z uwzględnieniem stałego przełożenia przekładni głównej i zmiennego promienia dynamicznego kół napędzanych,
- dodatkowo konieczne jest przesunięcie w czasie (przyspieszenie) o około 0,2 sekundy sygnału prędkości z GPS ze względu na opóźnienie wynikające z czasu przetwarzania informacji w tym odbiorniku,

W końcowej formie otrzymywane są dwa sygnały, które są podstawą regulacji pracy stanowiska, tak aby osiągnąć odzwierciedlenie warunków obciążeń eksploatacyjnych poprzez odtworzenie dwóch profili czasowych – otwarcia przepustnicy oraz wzdłużnej samochodu. Przykładowy zapis gotowych do symulacji sygnałów przedstawiono na rys.5 .

4.2. Wyniki badań opracowanego algorytmu

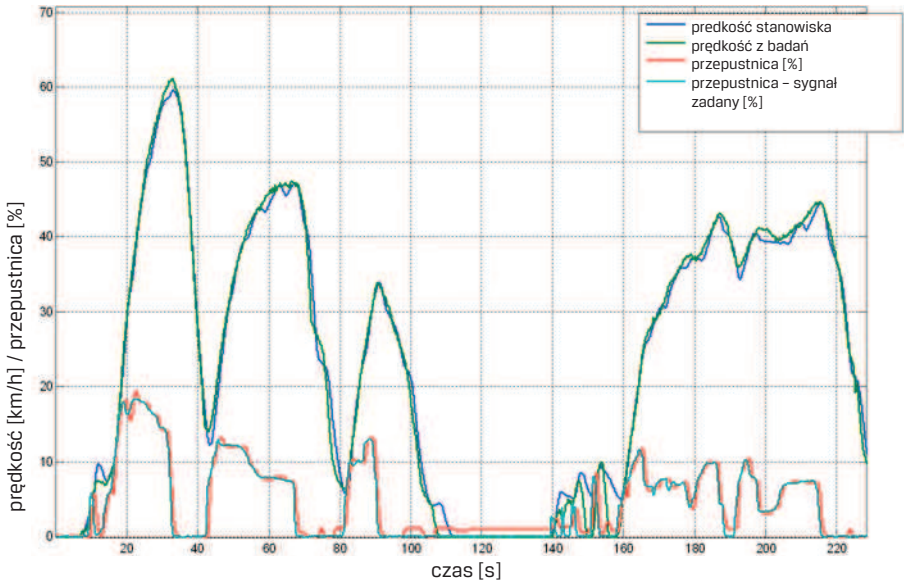
W wyniku realizacji przedstawionej koncepcji sterowania w formie fizycznej, poprzedzonej wcześniej badaniami modelowymi zrealizowanymi przez autorów i przedstawionych w pracach [11,12] uzyskano możliwość potwierdzenia skuteczności zaproponowanej metody sterowania oraz metody budowy sterownika, jaką była metoda szybkiego prototypowania sterowników.

Porównując wersje sterownika przedstawione w publikacji [12] opracowanego w trakcie badań modelowych zauważyć można jego znaczne skomplikowanie wynikające z potrzeby uwzględnienia wielu ograniczeń technicznych, których nie uwzględniono w trakcie badań modelowych (ma to swoje źródło w konieczności stosowania uproszczonych modeli jak i braku pełnej wiedzy o charakterystykach układów rzeczywistych na etapie badań modelowych).

Na rys. 9 na pierwszym wykresie pod prędkościomierzem oraz na rys. 10 przedstawiono przykładowe wyniki odtworzenia zmian prędkości pojazdu w odpowiedzi na zadane zmiany otwarcia przepustnicy. Jak widać obydwa procesy charakteryzują się dużą zmiennością czasie i tylko tego typu symulacja stanowiskowa pozwala w sposób powtarzalny analizować pracę układu napędowego, szczególnie w warunkach jazdy miejskiej.

Uzyskiwane wyniki pokazują dużą jakościową oraz ilościową zgodność uzyskanych wyników z oczekiwanymi (odtwarzanie profilu prędkości). W niektórych sytuacjach – gdy warunki próby nie spełniają możliwości technicznych stanowiska – brak dodatkowego momentu napędowego – rozbieżność osiąga większe wartości (rzędu kilku km/h) jednak w większości realizowanych procesów różnice te nie przekraczają 1...2 km/h.

Pomimo uzyskania nie 100% skuteczności odtworzenia profilu prędkości, w większości czasu realizacji odtwarzania przejazdu w warunkach eksploatacyjnych uzyskano wynik



Rys. 10. Wynik realizacji procesu stanowiskowej symulacji odtwarzającej dla jazdy miejskiej z wykorzystaniem opracowanego stanowiska i układu sterującego.

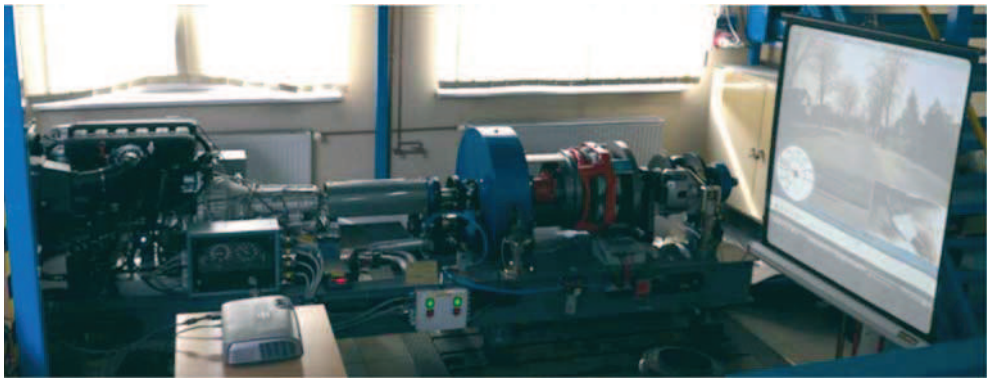
różnicy pomiędzy prędkością uzyskaną na stanowisku i w badaniach na poziomie kilku procent. Pozostała niedokładność jest spowodowana przede wszystkim niewystarczającymi charakterystykami układów wykonawczych – przede wszystkim szybkością reakcji serwomechanizmu (nastawnika przepustnicy) oraz brakiem możliwości napędu stanowiska z dodatkowego źródła.

Są to ograniczenia techniczne, które mogą być usunięte i nie podważają ogólnego wyniku projektowanego algorytmu, o czym świadczą z kolei pozytywne wyniki symulacji off-line.

Dla potrzeb poglądowych oraz dla dodatkowej weryfikacji realizacji symulacji odtwarzającej wykonano także eksperyment polegający na zestawieniu pracy stanowiska w czasie rzeczywistym, sterowanego opracowanym sterownikiem z obrazem zarejestrowanym podczas badań drogowych przy pomocy system rejestracji video zintegrowanym z odbiornikiem GPS.

Podczas badań drogowych zarejestrowano obraz widoczny z wnętrza pojazdu, nagrany z dwóch kamer - jednej rejestrującej obraz widziany przez kierowcę oraz drugiej rejestrującej obsługę pedału sterowania przepustnicą i hamulcem w samochodzie.

W tych samych badaniach zarejestrowano podstawowe parametry potrzebne do realizacji symulacji odtwarzającej – sygnał stopnia otwarcia przepustnicy oraz sygnał prędkości wzdłużnej pojazdu. Następnie zrealizowano eksperyment weryfikacyjny podczas którego zapis filmu z tego przejazdu został odtworzony na niezależnym komputerze. Poprzez manualną synchronizację startu filmu ze startem odtwarzania zarejestrowanego procesu



Rys. 11. Widok stanowiska podczas realizacji eksperymentu weryfikacji poprzez porównanie pracy stanowiska z obrazem video zapisanym podczas badań drogowych.

(podobnie zsynchronizowano dane podczas pomiarów) uzyskano jednoczesne odtwarzanie tego samego procesu na dwóch komputerach. Widok stanowiska podczas prowadzenia tego eksperymentu przedstawiono na rys.11.

Obserwacja sposobu operowania pedałami gazu i hamulca, zmian wskazań prędkości oraz miejsc zatrzymań pojazdu w pełni potwierdziła skuteczność realizacji symulacji odtwarzającej pokazując jednocześnie w najlepszy sposób jej ogólną ideę.

5. Podsumowanie i wnioski

W pracy przedstawiono wykorzystanie połączenia symulacji stanowiskowej z symulacją komputerową dla stworzenia stanowiska badawczego o zwiększonych możliwościach badawczych. W sposób szczególny uwzględniono proces budowy sterownika z wykorzystaniem metody szybkiego prototypowania sterowników.

Zbudowane stanowisko badawcze wraz z programem sterującym pozwala w efekcie na prowadzenie w warunkach laboratoryjnych eksperymentów badawczych w formie symulacji zarówno prognostycznej, jak i odtwarzającej w postaci całkowicie zautomatyzowanego odtwarzanie przebiegu jazdy w warunkach eksploatacyjnych.

Uzyskanie tych możliwości funkcjonalnych w powiązaniu z rejestracją wielu zmiennych dotyczących parametrów pracy silnika i skrzyni biegów pozwala prowadzić szereg powtarzalnych eksperymentów badawczych w zakresie np.:

- analizy osiągów,
- zużycia paliwa,
- emisji szkodliwych składników spalin,

- jakości sterownia silnikiem i skrzynią biegów,
- i wiele innych.

Wykorzystana metodyka budowy stanowiska i jego sterowania jest doskonałym przykładem pokazującym realne możliwości wykorzystania symulacji komputerowej w czasie rzeczywistym w połączeniu z wykorzystaniem teorii sterowania jak i modelowania matematycznego w konstrukcji i badaniach współczesnych maszyn i pojazdów.

Do osiągnięcia wyżej przedstawionego wyniku, zrealizowano także różne inne zadania badawcze opisane w poprzednich pracach autorów, które należy wspomnieć, ponieważ były one niezbędnymi elementami pozyskania wiedzy dla syntezy sterownika. Były to następujące działania:

- badania drogowe [10] dynamiki samochodu z automatyczną skrzynią biegów dla poznania i określenia wymagań dla realizacji stanowiskowej symulacji odtwarzającej,
- opracowanie modeli [11,12] dynamiki układu napędowego z automatyczną skrzynią biegów pracującego w samochodzie i na stanowisku badawczym dla wstępnych badań modelowych oraz dla wykorzystania metody szybkiego prototypowania sterowników.

Dalsze poprawienie jakości pracy stanowiska możliwe jest poprzez zastosowanie procesu opartego o samouczenie sterownika sposobu sterowania układem generatora momentu obciążenia układu napędowego tak, aby w kilku iteracjach sygnału sterującego dopracowywać jakość sterowania i uzyskać większą dokładność odtworzenia procesu eksploatacyjnego. Uzyskana w procesie „on-line" jakość sterowania wskazuje na duże szanse powodzenia tej koncepcji.

Literatura

[1]. BANSAL, K.: *Engine test bed's new capabilities based on real time simulation* – dostęp 03.2011 - http://www.testing-expo.com/

[2]. DUBOWSKI, A., MAC, J., WOJCIECHOWSKI, J., ŚLASKI, G.: *Wykorzystanie systemu Racelogic Video VBOX w badaniach nowego zestawu pojazdów,* materiały VIII Konferencji Naukowo - Technicznej LogiTrans 2010, Szczyrk 12-15.IV.2011 r. oraz w Logistyka 2/2011, dodatek „Logistyka-nauka" na CD, 10 stron.

[3]. FROSCHHAMMER, F., SCHITTENHELM, M., KEPPLER, R.: *BMW High-Dynamic Engine Test Benches using SIMPACK Real-Time Models*, 2009 – artykuł on-line, dostęp http://www.simpack.com, 03.2011.

[4]. FUNDOWICZ, P., REŃSKI, A., TRZCIŃSKI, S.: *Metoda stanowiskowych badań skrzynek biegów w stanach nieustalonych,* Zeszyty Instytut Pojazdów PW, 1(31)/99, ss. 5 – 36.

[5]. MAN, Y., CHEN, H. , GONG, J., JIN, H., WANG, Y., LI, H.: *Design and Development of a Real-time Dynamic AMT Test Bench for Simulating Total Road Forces of Vehicle,* Proceedings of 2008 SAE International Powertrains, Fuels and Lubricants Congress, June 2008, Shanghai, CHINA.

[6]. ORZEŁOWSKI, S.: *Eksperymentalne badania pojazdów i ich zespołów.* Warszawa, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1995.

[7]. PAWELSKI, Z.: *Napęd hybrydowy dla autobusu miejskiego,* Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej 1996.

[8]. PAWELSKI, Z.: *Stanowisko do badań układów napędowych wraz ze sterowaniem,* V konf. AUTOPROGRES'95, Jadwisin, 7-9.051995, cz. I ss.218-224.

[9]. PAWELSKI, Z., PAŁCZYŃSKI, T.: *Procedura budowy map sterowania układem napędowym z przekładnią bezstopniową CVT*, Mechanika, Wyd. Politechniki Krakowskiej, z.6, 2008, ss. 39-154.

[10]. ŚLASKI, G., WALKOWIAK, J., WALERJAŃCZYK, W.: *Drogowe badania warunków pracy układu napędowego z automatyczną skrzynią biegów dla stanowiskowej symulacji odtwarzającej,* Politechnika Radomska - Prace Naukowe „Transport" nr 1/27/2009, Logistyka 3/2009.

[11]. ŚLASKI, G., WALKOWIAK J: Badania modelowe koncepcji zmian stanowiska laboratoryjnego do badania układu napędowego z automatyczną skrzynia biegów, Teka Komisji Motoryzacji PAN, Zeszyt Nr 33-34/2008.

[12]. ŚLASKI, G., WALKOWIAK, J.: *Symulacja pracy układu wykonawczego i sterującego stanowiska badawczego układu napędowego samochodu z automatyczna skrzynią biegów,* (materiały CD - 10 stron), materiały IX Międzynarodowej Konferencji Hamulcowej, Łódź 2009.

[13]. WAELTERMANN, P., MICHALSKY, T., HELD, J.: *Hardware-in-the-Loop Testing in Racing Applications,* Proceedings of SAE Motor Sport Engineering Conference & Exhibition 2004, 30.11 – 2.12.04 Dearborn.