

Grzegorz ŚLASKI<sup>1</sup>  
Janusz WALKOWIAK<sup>2</sup>

### **STEROWANIE W CZASIE RZECZYWISTYM SYMULACJĄ STANOWISKOWĄ ODTWARZAJĄCĄ OBCIĄŻENIA UKŁADU NAPĘDOWEGO Z AUTOMATYCZNĄ SKRZYNIĄ BIEGÓW**

*W badaniach elementów układu napędowego w procesach nieustalonych wykorzystać można stanowisko badawcze pozwalające na generowanie zmiennych w czasie oporów ruchu dla układu napędowego. Przy odpowiednim sterowaniu i charakterystykach układu generowania oporów ruchu możliwe jest odtworzenie na stanowisku badawczym przebiegu procesów dynamicznych zarejestrowanych w badaniach drogowych pojazdu z układem napędowym identycznym z badanym na stanowisku. W artykule autorzy omawiają ogólną koncepcję sterowania stanowiskiem dla potrzeb realizacji symulacji odtwarzającej oraz prezentują wyniki takiej symulacji z wykorzystaniem przedstawionej koncepcji zaimplementowanej w prototypie sterownika zaprogramowanym w systemie Matlab/Simulink i zaimplementowanym na platformie sprzętowej dSpace.*

### **CONTROL OF A REAL TIME TEST BED SIMULATION REPRODUCING LOADS FOR DRIVETRIAN WITH AUTOMATIC TRANSMISSION**

*For testing drive train systems in transient processes test bed allowing to produce time varying motion resistance for drive train system can be used. Proper control and characteristics of resistance load generation system components gives the possibility to reproduce dynamic processes recorded during road test of car equipped with identical drive train system. In the paper authors describe overall concept of test bed control for the requirements of simulation reproducing dynamic processes of drive train and presents results of such a simulation performed with use of presented control concept. This concept was implemented using Matlab/Simulink software in controller prototype on dSpace platform.*

---

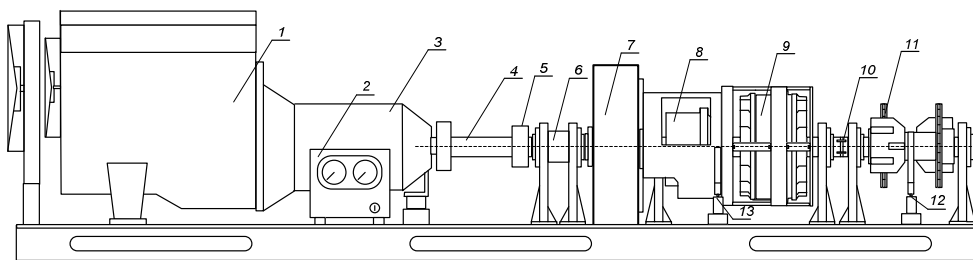
<sup>1</sup>Politechnika Poznańska, Instytut Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych, ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań, 061 6652 222, e-mail: grzegorz@slaski.eu

<sup>2</sup>Politechnika Poznańska, doktorant WMRIIT, tel: 061 8798940, ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań, e-mail: januszwalkowiak@neostrada.pl

## 1. WSTĘP

We wcześniejszych pracach autorów opisano stanowisko laboratoryjne do badania procesów dynamicznych w układzie napędowym z automatyczną skrzynią biegów [1, 2]. W niniejszej publikacji w związku z tym zamieszczono tylko skrótowy opis stanowiska. Widok ogólny przedstawiono na rys. 1. Ilustruje on najważniejsze podzespoły mechaniczne stanowiska, które podzielić można na badany układ silnika i automatycznej skrzyni biegów oraz podukład generowania oporów ruchu na stanowisku składający się z:

- koła zamachowego (masy wirującej) pozwalającej odtworzyć opory bezwładności samochodu,
- zespołu hamulców elektrowirowego i tarczowego pozwalających odtwarzać inne siły oporów - powietrza, toczenia a także siły hamowania układem hamulcowym.



Rys. 1. Schemat budowy 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 hamulca tarczowego, 12 – momentomierz zestawu hamulców ciernych, 13 – momentomierz hamulca elektrowirowego

O ile opór bezwładności generowany przez koło zamachowe jest odpowiedzią na przyłożony moment napędowy lub moment hamujący i nie ma konieczności sterowania jego wartością to pozostałe opory ruchu wymagają czynnego sterowania ich wartością wg założonych algorytmów.

Aby było to możliwe, zarówno hamulec elektrowirowy jak i tarczowy muszą posiadać układy pozwalające na sterowanie wartościami generowanych przez nie momentów hamujących a także układy pozwalające na pomiar tych momentów konieczny w realizacji sterowania w sprzężeniu zwrotnym.

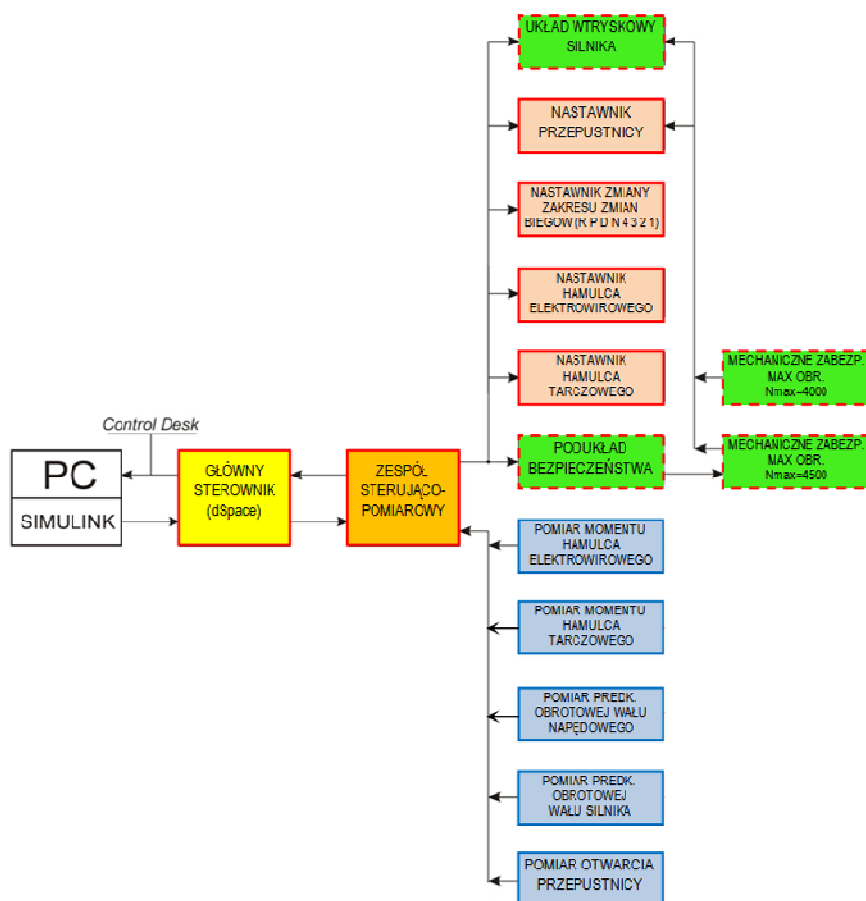
W przypadku hamulca elektrowirowego jest to elektroniczny układ regulacji prądu cewek tego hamulca realizowany z wykorzystaniem sygnału o modulowanej szerokości impulsu (sygnał PWM).

W przypadku hamulca tarczowego regulacja jest kilkustopniowa – bezpośrednio siła hamowania regulowana jest poprzez zmiany ciśnienia w siłowniku hydraulicznym zacisków dwóch hamulców tarczowych. Ciśnienie to generowane jest jednak przez typową pompę hamulcową, która wymaga przyłożenia odpowiedniej siły do tłoczyska tej pompy.

Jest to realizowane poprzez zmodyfikowaną dźwignię pedału hamulca. Dźwignia ta z kolei jest uruchamiana siłownikiem pneumatycznym, którego siła nacisku na dźwignię regulowana jest poprzez regulację ciśnienia powietrza w siłowniku. Do tej regulacji wykorzystywany jest sterowany elektronicznie zawór proporcjonalny.

Oba hamulce – tarczowy i elektrowirowy wyposażone są w momentomierze pozwalające na pomiar aktualnie generowanego momentu hamującego.

Widok schematu podukładów koniecznych do sterowania głównymi elementami stanowiska przedstawiono na rys. 2. Dla uproszczenia nie uwzględniono na nim wszystkich elementów po stronie części pomiarowej, w której poza sygnałami wykorzystywanymi podczas sterowania dokonuje się rejestracji sygnałów o charakterze tylko informacyjnym, takich jak temperatury cieczy chłodzącej, oleju silnika, płynu ATF w automatycznej skrzyni biegów, stanu elektrozaworów sterowania elektrohydraulicznego skrzyni biegów oraz sterowania układem zmiany rozrządu w silniku.



Rys. 2. Schemat podstawowego układu sterująco-pomiarowego

## 2. OGÓLNA KONCEPCJA ALGORYTMU STERUJCEGO STANOWISKA

W niniejszym podpunkcie omówiona została koncepcja sterowania, która dotyczy bloku „głównego sterownika” (rys. 2) zaimplementowanego na platformie dSpace.

Stanowisko badawcze przewidziane zostało do realizacji dwóch rodzajów symulacji procesów dynamicznych układu napędowego – symulacji odtwarzającej i prognostycznej. W przypadku pierwszego rodzaju symulacji zakłada się odtworzenie przebiegu zmian prędkości pojazdu (przeliczonej na prędkość obrotową wału napędowego odpowiadającą na stanowisku także prędkości obrotowej koła zamachowego) w czasie przy odtworzeniu zapisu zmian stopnia otwarcia przepustnicy zarejestrowanego równocześnie ze zmianami prędkości w czasie.

### 2.1 Ogólna koncepcja sterowania

Sygnalami zadającymi przebieg sterowania, będącymi punktem odniesienia są dwa sygnały zarejestrowane podczas prób drogowych:

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

Sygnaly te są sygnałami referencyjnymi dla dwóch sterowników pracujących w synchronizowany w czasie sposób. Pierwszy z nich – 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 (symulującego swoją bezwładnością bezwładność samochodu), która powinna w jak najlepszym stopniu odpowiadać prędkości samochodu podczas badań przeliczonej do prędkości wału napędowego.

Oba zadania mogą być zrealizowane tylko przy wykorzystaniu sterowania z uwzględnieniem regulacji w pętli sprzężenia zwrotnego. W przypadku pierwszego sterownika sygnałem sprzężenia jest rzeczywiste otwarcie przepustnicy mierzone na stanowisku a sygnałem zadanym jest otwarcie zarejestrowane podczas badań drogowych w samochodzie.

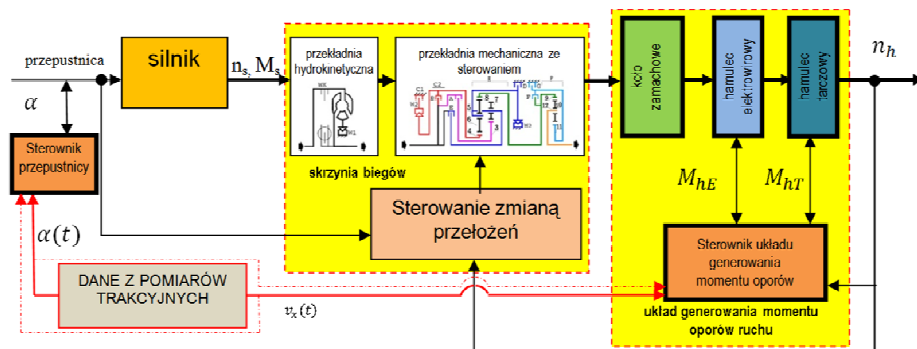
W przypadku drugiego sterownika pętla sprzężenia zwrotnego dotyczy prędkości obrotowej wału koła zamachowego i przeliczonej do wału napędowego prędkości samochodu zarejestrowanej podczas badań drogowych.

Najbardziej ogólny schemat sterowania pracą stanowiska dla potrzeb symulacji odtwarzającej ilustrujący powyższy opis przedstawiono na rys. 3. Uproszczona ogólna forma układu sterowania stanowiskiem przedstawiona na rysunku pozwala 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 przedstawionego procesu sterowania są o wiele bardziej rozbudowane.

Warto zwrócić uwagę na konieczność jednoczesnej pracy trzech elementów:

- bloku podawania zmieniających się w funkcji czasu symulacji wartości zmierzonych podczas badań drogowych - stopnia otwarcia przepustnicy  $\alpha(t)$  oraz prędkości wzdłużnej samochodu  $v_x(t)$ ; wartości te muszą być podawane w czasie rzeczywistym zgodnym z aktualnym czasem symulacji,
- bloku sterownika przepustnicy,
- bloku sterownika układu generowania oporów ruchu generującego moment przy pomocy hamulca elektrowirowego (moment  $M_{hE}$ ) oraz hamulca tarczowego (moment  $M_{hT}$ ).



Rys. 3. Schemat sterowania pracą stanowiska dla potrzeb symulacji odtwarzającej

## 2.2 Sterownik przepustnicy

Sterownik przepustnicy (rys.4) realizuje dwa zadania:

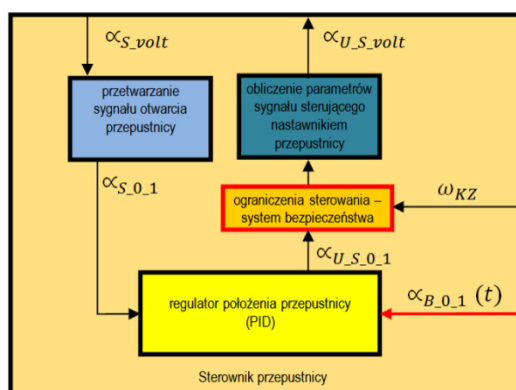
- podstawowe - związane z realizacją symulacji odtwarzającej – reguluje chwilowe otwarcie przepustnicy tak aby uzyskać jego zgodność z sygnałem zadany jakim jest sygnał otwarcia przepustnicy zarejestrowany podczas badań drogowych samochodu,
- dodatkowe – modyfikuje sterowanie wynikające z realizacji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

Sam proces regulacji położenia przepustnicy oparty został o regulator proporcjonalno-całkująco-różniczkujący (PID), dla którego w procesie szybkiego prototypowania dobrano parametry wzmocnień poszczególnych członów. Dodatkowo zastosowano możliwość wyprzedzenia informacji o stopniu otwarcia przepustnicy dla częściowego zniwelowania opóźnienia w układzie nastawnika przepustnicy.

Pomiar stopnia otwarcia przepustnicy na stanowisku oparty jest o wykorzystanie sygnału czujnika otwarcia przepustnicy dającego na wyjściu analogowy sygnał napięciowy  $\alpha_{S\_volt}$ , stosowanego seryjnie w tym rozwiązaniu silnika. W układzie sterownika przepustnicy sygnał ten poddawany jest obróbce i przeliczeniu na znormalizowaną postać ( $\alpha_{S\_0\_1}$ ) w zakresie wartości liczbowych od 0 do 1 mieszczących się pomiędzy stanem zamknięcia i maksymalnego otwarcia przepustnicy.

Podobnie w przypadku sterowania przepustnicą konieczne jest działanie podobne, ale przeciwne do sygnału otwarcia. Także tutaj postać sygnału używana w regulatorze ( $\alpha_{U_S,0,1}$ ) jest inna niż postać sygnału umożliwiającą wysterowanie nastawnika przepustnicy (serwomechanizm) - ( $\alpha_{U_S,volt}$ ). Ze względu na sprzętowe dostosowanie nastawnika przepustnicy do sterowania napięciowym sygnałem analogowym, taki sygnał jest formowany w ostatnim etapie pracy sterownika przepustnicy.

Ogólny schemat sterownika przepustnicy przedstawia rys. 8



Rys. 4. Struktura sterownika przepustnicy

### 2.3 Sterownik układu generowania oporów ruchu

Sterownik układu generowania porów ruchu (rys. 5) ma za zadanie przede wszystkim tak sterować momentem oporów ruchu, aby różnica między prędkością kątową koła zamachowego  $\omega_{KZ}$  w danej sekundzie symulacji a odpowiadającą tej sekundzie prędkością  $v_x(t)$  zmierzoną w trakcie badań drogowych była jak najmniejsza. Prędkość  $v_x(t)$  jest przeliczana w sterowniku na prędkość kątową wału.

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

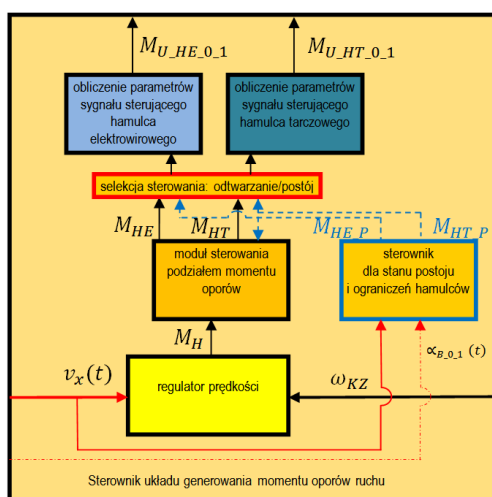
Hamulec elektrowirowy jest hamulcem o dynamice sterowania na tyle szybkiej, że pozwoliło to na wykorzystanie go bezpośrednio w pętli sprzężenia zwrotnego dla regulacji prędkości. Hamulec tarczowy ze względu na duże opóźnienie odpowiedzi na zadawane sterowanie pozwolił na realizację sterowania w pętli otwartej w oparciu o dwa sposoby sterowania zależne od dwóch sytuacji wymagających wykorzystania tego hamulca:

- dla symulacji procesu hamowania samochodu z opóźnieniem większym od  $3 \text{ m/s}^2$  (maksymalne możliwe do uzyskania z wykorzystaniem jedynie hamulca elektrowirowego) sterowanie odbywa się na podstawie prognozy z ustalonym na podstawie dynamiki układu sterowania hamulcem tarczowym wyprzedzenia,

- wymaganego opóźnienia i przeliczenia jego wartości na poziom nastawy sterowania hamulcem tarczowym  $M_{HT}$ ,
- dla realizacji procesu zatrzymania ruchu obrotowego koła zamachowego (przy prędkościach poniżej których moment hamujący hamulca elektrowirowego uniemożliwia zatrzymanie koła zamachowego) sterowanie realizowane jest wg zaprogramowanego przebiegu płynnego narastania momentu hamującego  $M_{HT\_P}$  do zatrzymania i utrzymywania tego stanu do wystąpienia warunków w sygnałach z badań drogowych odpowiadających rozpoczęciu procesu ruszania samochodu.

Blok selekcji sterowania pomiędzy realizacją procesu odtwarzania prędkości a realizacją stanu zatrzymania pozwala przełączyć źródło sygnału sterującego pomiędzy dwoma blokami sterowania.

Blok modułu sterowania podziałem momentu oporów ruchu realizuje uwzględnianie pracy hamulca tarczowego w symulacji procesu hamowania z opóźnieniami większymi od  $3 \text{ m/s}^2$  lub w stanach wyczerpania zakresu generowania momentu hamującego przez hamulec elektrowirowy w zakresie bardzo niskich prędkości obrotowych.



Rys. 5. Struktura sterownika układu generowania momentu oporów ruchu

W samym procesie regulacji prędkości wykorzystano również zmodyfikowany regulator typu proporcjonalno-całkująco-różniczkujący (PID), dla którego w procesie szybkiego prototypowania dobrano parametry wzmocnień poszczególnych członów, oraz opracowano pewne ograniczenia pracy wynikające z faktu istnienia stanów pracy, w których niemożliwe jest osiągnięcie uchybu regulacji równego zero 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. Dla uniknięcia tych problemów

konieczna jest odpowiednia modyfikacja pracy regulatora. Ogólny schemat sterownika układu generowania momentu oporów ruchu przedstawia rys. 5

Sterowanie hamulcami odbywa się z wykorzystaniem dwóch rodzajów sygnałów sterujących:

- hamulec elektrowirowy sterowany jest sygnałem typu PWM (Puls Width Modulation) - jest on tworzony w karcie wyjść na podstawie wartości znormalizowanego sygnału o wartościach od 0 do 1 - stąd istnienie w regulatorze bloku formującego taką postać sygnału -  $M_{U_{HE},0,1}$ .
- hamulec tarczowy sterowany jest sygnałem analogowym, jednak dla ułatwienia budowy sterownika, również ten sygnał jest normalizowany do zakresu wartości od 0 do 1 - sygnał  $a_{M_{U_{HT},0,1}}$ , dopiero następnie przeliczany na zakres napięć przy których pracuje elektrozawór zaworu proporcjonalnego wykorzystanego do sterowania siłownikiem pneumatycznym obsługującym hydrauliczną pompę hamulcową.

W tym celu w strukturze programu sterującego muszą być uwzględnione odpowiednie bloki transformacji postaci sygnału na odpowiednią dla danego nastawnika.

### 3. NARZĘDZIA SZYBKIEGO PROTOTYPOWANIA

Program sterujący „głównego sterownika” (rys 2) został zbudowany w oparciu o przedstawioną koncepcję jego struktury. Z uwagi na dużą złożoność układu sterowania, na badawczy charakter stanowiska oraz dla obniżenia kosztów i przyspieszenia czasu realizacji budowy zrezygnowano z wykonania fizycznego regulatora, a zastosowano metodę szybkiego prototypowania (Rapid prototyping) w środowisku MATLAB – Simulink na platformie sprzętowej dSpace. Istotą szybkiego prototypowania jest automatyczna implementacja schematu blokowego sterownika do pracy w czasie rzeczywistym na wybranej platformie sprzętowej oraz możliwość jego strojenia on-line [4].



Rys. 6. Widok: 1 - komputera z oprogramowaniem Control Desk, 2 - zespołu sterująco-pomiarowego, 3 - platformy dSpace oraz 4 - stanowiska badawczego



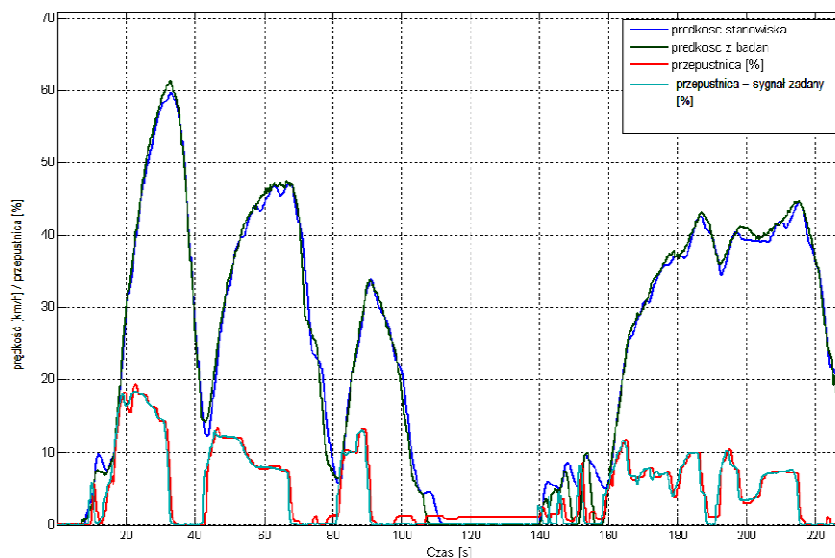
Oprogramowanie MATLAB/Simulink wraz z odpowiednimi narzędziami pozwala na modelowanie obiektów sterowania i różnego rodzaju regulatorów. Następnie korzystając z dostępnych modułów programowych możliwe jest wykonanie jego kompilacji do postaci wykonywalnej na platformie sprzętowej firmy dSpace składającej się z komputera czasu rzeczywistego współpracującego z kartami wejść/wyjść dla sygnałów mierzonych i sterujących [4, 5]

Zaletą metody szybkiego prototypowania jest to, że podczas prób sterownika możliwy jest dostęp do podglądu w czasie rzeczywistym a także do zapisu 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 umożliwia to oprogramowanie ControlDesk pozwalające tworzyć dowolne środowiska graficzne sterowania i analizy mierzonych sygnałów w postaci wirtualnych paneli sterowniczych oraz dające możliwość zapisu przebiegów czasowych wszelkich sygnałów wykorzystywanych w sterowniku oraz umożliwiającą szybką modyfikację parametrów bloków prototypowanego sterownika.

#### 4. WYNIKI BADAŃ OPRACOWANEGO ALGORYTMU

W efekcie implementacji prototypowanego sterownika uzyskano możliwość weryfikacji poprawności zaproponowanej koncepcji oraz ustalono kierunki dalszego rozwoju tej koncepcji i uszczegółowienia sterownika o szereg funkcji związanych z reakcją na bardziej skomplikowane przypadki w procesie realizacji symulacji odtwarzającej.



Rys. 7. Wykres sygnałów prędkości i kąta otwarcia przepustnicy zarejestrowanych w trakcie badań drogowych oraz odtworzonych na stanowisku badawczym

## 5. WNIOSKI

W wyniku realizacji sterownika wg zaproponowanej koncepcji uzyskano stanowisko badawcze zdolne do odtworzenia procesów dynamicznych zachodzących w układzie napędowym samochodu w warunkach laboratoryjnych. Dotychczas uzyskane wyniki bazujące na wstępnej wersji programu sterującego pokazują ogólną zgodność uzyskanych wyników z oczekiwanymi (odtworzenie profilu prędkości) i jednocześnie wskazują potrzebę precyzyjnego dopracowania programu sterującego w zakresie doboru parametrów poszczególnych modułów sterownika symulacji w celu zapewnienia możliwie najlepszej jakości sterowania. Sposób sterowania i charakterystyka hamulca ciernego zgodnie z oczekiwaniami pozwoliły na odtworzenie procesu zatrzymania ruchu masy wirującej a hamulec elektrowirowy spełnia swoją rolę jako narzędzie aktywnej i szybkiej regulacji momentu w stanach, w których prędkość obrotowa jest wyższa od minimalnej pozwalającej uzyskać wystarczający do sterowania stanowiskiem moment hamujący.

Eksperymenty wykonane na rzeczywistym obiekcie wskazały także szereg technicznych ograniczeń, których uwzględnienie znacząco wpływa na rozbudowanie programu sterującego w stosunku do jego struktury wynikającej z analizy samego sterowanego procesu.

Narzędziem w największym stopniu pozwalającym na szybkie dostosowywanie rozbudowanej struktury i parametrów sterownika do modyfikacji koniecznej w efekcie analizy wyników badań eksperymentalnych stanowiska, jest metoda szybkiego prototypowania i dostępne dla jej technicznej realizacji oprogramowanie oraz platforma sprzętowa.

## 6. BIBLIOGRAFIA

- [1] Walkowiak J., *Budowa i właściwości funkcjonalne stanowiska badawczego układu napędowego z automatyczną skrzynią biegów*, 14th International Conference, Computer Systems Aided Science, Industry and Transport, 6-9.12.2010, Zakopane, conference proceedings, streszczenie str. 401, artykuł (10 stron) na dołączonym nośniku CD, artykuł opublikowany także w czasopiśmie Logistyka 6/2010.
- [2] Ślaski G., Walkowiak J.: *Symulacja pracy układu wykonawczego i sterującego stanowiska badawczego układu napędowego samochodu z automatyczną skrzynią biegów*, (materiały CD - 10 stron), materiały IX Międzynarodowej Konferencji Hamulcowej, Łódź 2009.
- [3] Mrozek Z.: *Komputerowo wspomagane projektowanie systemów mechatronicznych* Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej 2002 ISSN 1642-0802
- [4] Uhl T., Bojko T., Mrozek Z., Szwabowski W.: *Rapid prototyping of mechatronic system. Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 38(3):645-668, 2000
- [5] Zaczyk M.: *Szybkie prototypowanie z wykorzystaniem sterownika dSPACE DS1104 oraz oprogramowania RTI i ControlDesk art. umieszczony na stronach Katedra Automatyki AGH Kraków 2007, pod adresem: <http://www.ia.agh.edu.pl/~mza/Kons.i%20progr.%20robotow/scara/DS1104.pdf>*