

*dynamika pojazdów, automatyczna skrzynia biegów,
symulacyjne badania stanowiskowe, hamulec elektrowirowy,
hamulec tarczowy, sterowanie elektroniczne*

Janusz WALKOWIAK¹

BUDOWA I WŁAŚCIWOŚCI FUNKCJONALNE STANOWISKA BADAWCZEGO UKŁADU NAPĘDOWEGO Z AUTOMATYCZNĄ SKRZYNIĄ BIEGÓW

W artykule zaprezentowano budowę i właściwości funkcjonalne stanowiska badawczego układu napędowego samochodu osobowego z automatyczną skrzynią biegów. Stanowisko to umożliwia prowadzenie symulacyjnych badań stanowiskowych w warunkach laboratoryjnych. Jego funkcjonalność pozwala na badanie dynamiki układu napędowego w procesach przejściowych. Może ono być użyte także dla testowania hamulca elektrowirowego stosowanego jako retarder a także do testowania hamulców tarczowych samochodu osobowego.

Artykuł przedstawia także ważne układy bezpieczeństwa zastosowane w tym stanowisku.

STRUCTURE AND FUNCTIONALITY OF TEST BENCH OF DRIVELINE WITH AUTOMATIC TRANSMISSION

In this paper the structure and functionality of test bench of passenger car driveline equipped with automatic transmission. This test bench allows to perform simulation bench tests in laboratory. Its functionality allows to make tests on transient dynamics of driveline. It can be also used for testing of Eddy current brake used as a retarder and also disc brakes of passenger car.

Article presents also some important safety devices used in construction of this stand.

1. WSTĘP

Badanie dynamiki wzdłużnej samochodu i dynamiki układu napędowego prowadzić można w różny sposób – w ramach badań trakcyjnych, poligonowych, laboratoryjnych jak i badań modelowych z wykorzystaniem symulacji komputerowej [1]. Autor niniejszego artykułu przedstawia stanowisko umożliwiające prowadzenie badań na rzeczywistym układzie napędowym w warunkach symulowanych obciążen układu napędowego. Forma symulacji może być dwojaka i dotyczyć symulacji prognostycznej jak i symulacji odtwarzającej.

¹ Politechnika Poznańska, doktorant WMRiT, tel: 061 8798940, ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań,
e-mail: januszwalkowiak@neostrada.pl

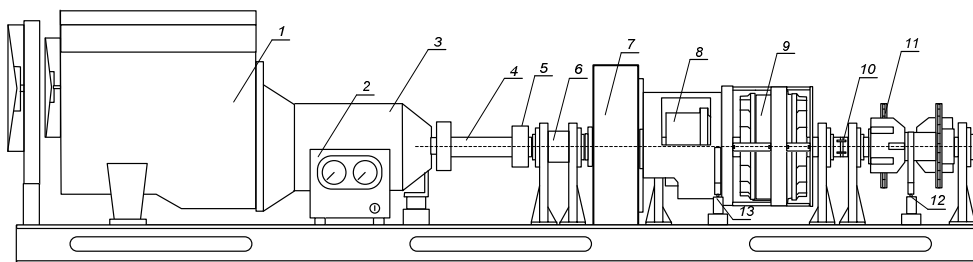
W pierwszym przypadku zadanie polegać będzie na uzyskaniu możliwości zadawania dowolnego przebiegu zmian otwarcia przepustnicy i automatycznym generowaniu momentu oporów ruchu adekwatnie do przyjętych arbitralnie parametrów drogi i czynników wpływających na opory ruchu pojazdu. W przypadku symulacji odtwarzającej jej celem jest odtworzenie sterowania przepustnicą oraz profilu prędkości pojazdu zgodnego z obserwowanym w trakcie wcześniej wykonanych badań drogowych. Układ sterujący stanowiska samoczynnie będzie sterował poziomem momentu oporów ruchu obciążającego układ napędowy tak aby w efekcie uzyskać zgodność z zapisanym w trakcie badań przebiegiem zmian prędkości obrotowej wału napędowego.

2. OGÓLNA BUDOWA STANOWISKA

Stanowisko zostało zbudowane w oparciu o oryginalne zespoły samochodu BMW-E36. Wykorzystano sześciocylindrowy, rzędowy silnik ZI M50B oraz automatyczną skrzynię biegów ZF 5HP18 wraz z osprzętem i elektronicznymi układami sterowania pracą tych podzespołów. Jego kompletna budowa przedstawiona jest na rys. 1.

Układ generujący opory ruchu pojazdu, toczenia, powietrza, wzniesienia i hamowania realizuje je przy pomocy hamulca elektrowirowego i zespołu hamulca tarczowego. Natomiast opory bezwładności samochodu są symulowane masą zastępczą o określonym momencie bezwładności. Dla uzyskania optymalnych obrotów pracy hamulca elektrowirowego i tarczowego zastosowano przekładnię redukcyjną o przełożeniu $i_r=2,72$, aby nie przekraczać dopuszczalnej prędkości obrotowej dla tych hamulców.

Pracą układu generowania momentów oporów ruchu dla celów poglądowych sterować można manualnie za pomocą elektronicznego układu sterującego lub w celu realizacji wspomnianych symulacji za pomocą prototypowego układu sterowania przygotowanego specjalnie dla tego stanowiska i zaimplementowanego na platformie prototypowania układów sterowania firmy dSpace.



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

Oprócz układu sterującego stanowisko zostało wyposażone w układ pomiarowy umożliwiający rejestrację wielu sygnałów obrazujących dynamikę i inne parametry badanego układu.

3. ZABUDOWA UKŁADU NAPĘDOWEGO NA STANOWISKU

W niniejszej części artykułu przedstawiono sposób zabudowy układu napędowego na stanowisku wraz z silnikiem. W dalszej omówiono układ generowania momentu oporów ruchu oraz układ sterujący.

3.1 Rama stanowiska

Podzespoły stanowiska zostały umieszczone na specjalnie skonstruowanej ramie, która z kolei jest przytwierdzona za pośrednictwem elementów wibroizolacyjnych do ławy fundamentowej w laboratorium. Rama umożliwiła połączenie elastycznie zamontowanego zespołu silnika z automatyczną skrzynią biegów z układem generowania momentu obrotowego oporów ruchu samochodu.

3.2 Silnik i układy niezbędne do jego funkcjonowania

Silnik został zamontowany na ramie przy pomocy oryginalnie stosowanych elementów zawieszenia silnika w samochodzie. Zapewnia to właściwą pracę silnika na stanowisku bez przenoszenia drgań na jego ramę.

Silnik posiada kompletny osprzęt stosowany z nim w zabudowie w samochodzie. Jednak jego umieszczenie na stanowisku wymagało dostosowania pewnych podukładów do zmienionych warunków pracy lub nieopłacalnego czy też nieuzasadnionego merytorycznie przeniesienia układów pomocniczych w wersji oryginalnej z samochodu.

Układ chłodzenia został rozbudowany o dodatkowy wentylator w celu zwiększenia intensywności przepływu powietrza przez chłodnicę, zbyt małej na stanowisku. Wynika to z braku na stanowisku wymuszonego opływu powietrza występującego w samochodzie w związku z jego ruchem z dużą prędkością względem otaczającego środowiska. Strasznie skomplikowane zdanie, prawie jak stanowisko, szczególnie słowo „niewystarczającej” :)

Ze względu na ograniczenia gabarytowe oraz miejsce odprowadzenia spalin zmodyfikowano konfigurację geometryczną ułożenia elementów układu wydechowego z zastosowaniem oryginalnych tłumików.

Zbudowano dla potrzeb stanowiska zbiornik paliwa, który został zamontowany w wolnej przestrzeni ramy nośnej. Zbiornik wyposażono w oryginalną pompę paliwa.

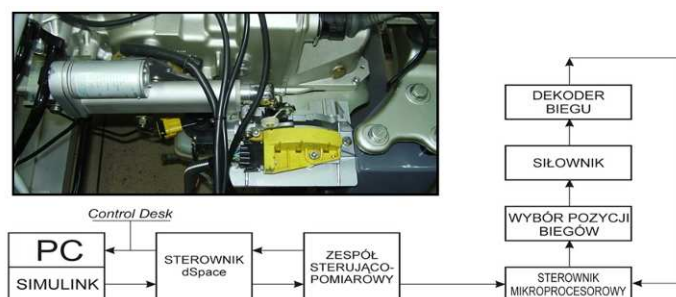
Układ sterowania elektronicznego zapłonem i wtryskiem paliwa jest oryginalnym układem stosowanym w tym silniku, podobnie jak instrumenty kontrolno pomiarowe w postaci obrotomierza i zespołu innych wskaźników stosowanych w samochodzie na bazie którego zbudowano stanowisko.

3.3 Automatyczna skrzynia biegów

Automatyczna skrzynia biegów zastosowana na stanowisku jest hydromechaniczną skrzynią biegów o sterowaniu elektrohydraulicznym, składającą się z przekładni

hydrokinetycznej wyposażonej w sprzęgło blokujące oraz 5 biegowej przekładni planetarnej. Jest to skrzynia produkowana przez firmę ZF o symbolu ZF 5HP18. Skrzynia poza kilkoma zakresami pracy (R,N,D,4,3,2) posiada także trzy programy – sportowy (S), ekonomiczny (E) oraz zimowy (*) [2].

Zastosowano oryginalny system poduszek mocujących oraz układ sterujący pracą skrzyni. Mechanizm zmiany zakresu pracy skrzyni biegów został zmieniony z manualnego na sterowany mechatronicznie – jego schemat i widok pokazano na rys. 2.



Rys. 2. Schemat układu sterowania zmianą biegów z widokiem siłownika i zespołu wybierania zakresu pracy skrzyni biegów

Wykorzystano w tym celu siłownik wykonujący ruch liniowy napędzany poprzez przekładnię silnikiem prądu stałego oraz odpowiednio zaprogramowany sterownik sterujący pracą tego siłownika (uzyskiwanie określonych położeń odpowiadających pozycjom stosowanej w samochodzie dźwigni wybieraka zakresów R,N,D,4,3,2 pracy skrzyni).

3.4 Przeniesienie napędu do układu generowania oporów ruchu

Do przeniesienia napędu ze skrzyni biegów do układu generowania momentu oporów ruchu wykorzystano skrócony wał napędowy ułożyskowany w podporach oraz sprzęgło tulejowe, z możliwością zastąpienia go sprzęgłem elastycznym.

Zrezygnowano z zastosowania przekładni głównej ze względu na przyjętą koncepcję symulacji oporu bezwładności samochodu zredukowanego do wału napędowego.

Jednak ograniczenia dotyczące zakresu pracy zastosowanego na stanowisku hamulca elektrowirowego i tarczowego wymusiły zastosowanie przekładni redukującej prędkość obrotową za masą wirującą, a przed wymienionymi hamulcami. Zastosowano przekładnię planetarną o przełożeniu redukującym 2,72.

Wał napędowy wyposażony został w układ telemetrycznego pomiaru momentu obrotowego, pozwalający na mierzenie całościowego momentu oporów ruchu włącznie z oporem bezwładności.

4. UKŁAD GENEROWANIA MOMENTU OPORÓW RUCHU

Stanowisko pozwala na wygenerowanie momentu oporów ruchu o wartościach typowych dla pracy badanego układu napędowego. Przyjęto podczas projektowania ich graniczną wartość na poziomie hamowania awaryjnego samochodu. Brak jest w jego obecnej konfiguracji możliwości symulowania dowolnej wartości momentu napędowego wynikającego z sił grawitacji podczas zjazdu ze wzniesienia. Jedyną możliwością jest wyzerowanie innych oporów ruchu. Pozwala to na częściowe uwzględnienie tego typu sytuacji.

4.1 Koło zamachowe

Koło zamachowe jest pierwszym elementem układu generowania momentu oporów ruchu samochodu. Służy ono do obciążenia układu napędowego momentem bezwładności. Moment bezwładności koła zamachowego został dobrany tak, aby jego energia kinetyczna w ruchu obrotowym z określoną prędkością wału, odpowiadała całkowitej energii kinetycznej samochodu przy prędkości odpowiadającej tej prędkości obrotowej wału. Uwzględniono przy tym także bezwładności innych istniejących mas wirujących na stanowisku. Na podstawie danych technicznych, pomiarów i danych literaturowych przyjęto do zamodelowania masę samochodu równą 1605 kg, moment bezwładności jednego koła jezdnego równy $0,65 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, moment bezwładności rotora hamulca elektrowirowego $1,69 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ oraz moment bezwładności jednej tarczy na stanowisku badawczym równy $0,2 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$. Po odpowiednim zredukowaniu do wału napędowego przyjęto moment bezwładności zastępczej masy wirującej równy $14,53 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$.

Koło zamachowe zostało zamontowane w ruchomej obudowie będącej jednocześnie elementem mocującym dla hamulca elektrowirowego. Obliczenia wytrzymałościowe wskazały na bezpieczną pracę masy do max 6500 obr/min, jednak dla bezpieczeństwa zostały one ograniczone odpowiednimi zabezpieczeniami mechanicznymi i elektronicznymi do 4500 obr/min. Koło zamachowe po osadzeniu na wale poddano wyważeniu i badaniom defektoskopowym – rys. 3.

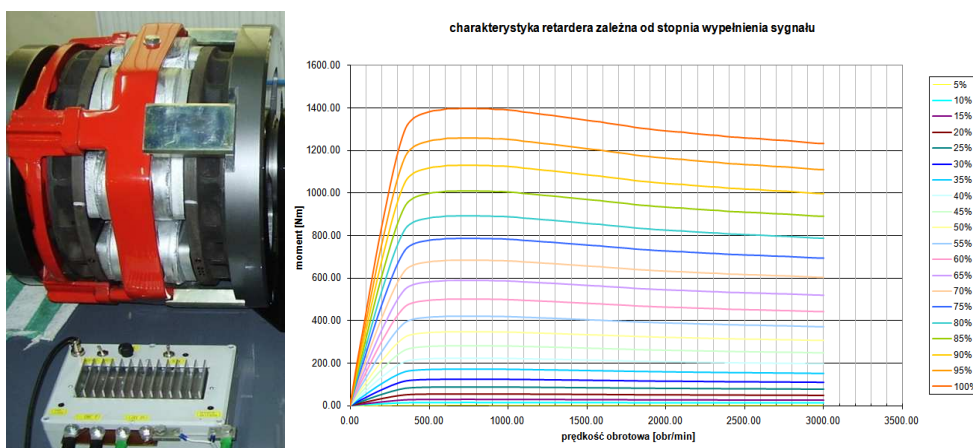


Rys. 3. Widok koła zamachowego wraz z wałem podczas badań defektoskopowych oraz umieszczenia w obudowie

4.2 Hamulec elektrowirowy

Do generowania momentu oporów ruchu dla prędkości obrotowych większych niż 100...200 obr/min wykorzystano hamulec elektrowirowy stosowany jako retarder w samochodach ciężarowych. Jest to retarder marki KLAM, model 140 [3]. Retarder posiada wymuszone chłodzenie powietrzem

Podany zakres prędkości obrotowych wynika z charakterystyki retardera – rys. 4, który mimo maksymalnego momentu hamującego równego 1400 Nm daje moment hamujący większy niż 200 Nm dopiero przy 50 obr/min.



Rys. 4. Widok hamulca elektrowirowego wraz z modulem sterowania oraz charakterystyka momentu hamującego w funkcji prędkości obrotowej i wypełnienia sygnału sterującego[4]

4.3 Zespół hamulców tarczowych

Zespół dwóch hamulców tarczowych przeznaczony jest do generowania momentu hamującego przy minimalnych obrotach wału i masy wirującej, a także przy braku ruchu tych elementów. Jest to konieczne ze względu na generowanie przez przekładnię hydrokinetyczną tzw. momentu wleczenia, powodującego tendencję do ruszania samochodu mimo pracy silnika na biegu jałowym. Wykonane w ramach badań drogowych testy wykazały, że konieczne jest generowanie momentu rzędu nawet stu kilkudziesięciu Nm w celu utrzymania samochodu w bezruchu (na stanowisku koła zamachowego) [5].

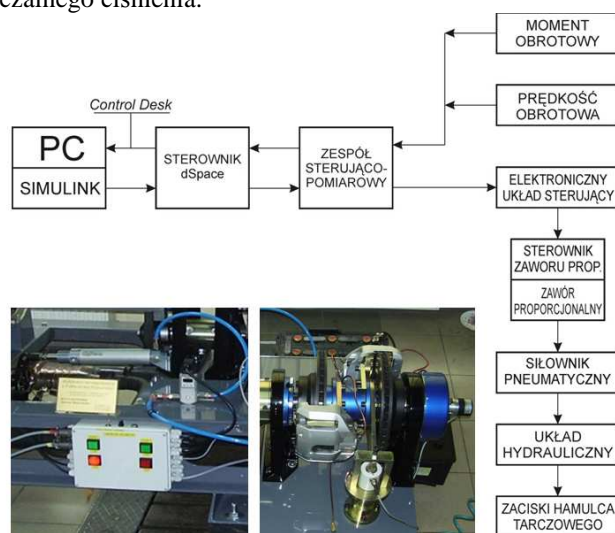
Zespół hamulca tarczowego składa się z dwóch tarczy o średnicy 350 mm i pompy hamulcowej pozyskanych z samochodu BMW 750. Zespół ten pozwala na generowanie momentu hamującego większego niż uzyskiwany w samochodzie badawczym BMW-E36.

Hamulce tarczowe są sterowane wspólną pompą hamulcową wchodzącą w skład elektryczno-pneumatyczno-hydraulicznego układu uruchamiania hamulców tarczowych ze wspomaganie podciśnieniowym – rys. 5.

Pierwotnym sygnałem sterującym jest sygnał napięciowy podawany na elektroniczny regulator proporcjonalny ciśnienia w układzie pneumatycznym. Ciśnienie to uruchamia siłownik pneumatyczny, który poprzez dźwignię hamulca uruchamia hydrauliczną pompę

hamulcową roboczego hydraulicznego układu hamulcowego samochodu osobowego wspomaganą siłownikiem podciśnieniowym.

Regulator proporcjonalny steruje ciśnieniem w układzie siłownika zgodnie z napięciowym sygnałem sterującym w pełnym zakresie zadanego ciśnienia powietrza. W celu uniknięcia przekroczenia maksymalnego ciśnienia w układzie hydraulicznym zastosowano regulator mechaniczny ciśnienia powietrza, który pozwala na doświadczalne ustawienie dopuszczalnego ciśnienia.



Rys. 5. Widok zespołu hamulców ciernych tarczowych oraz siłownika i zaworu proporcjonalnego pneumatycznego oraz schemat układu sterowania hamulcami tarczowymi

5. UKŁADY BEZPIECZEŃSTWA

Ze względu na teoretyczną możliwość przekroczenia zakresu bezpiecznych obrotów lub bezpiecznego poziomu momentu hamującego, a także błędy obsługi skrzyni biegów na stanowisku zastosowano kilka układów bezpieczeństwa.

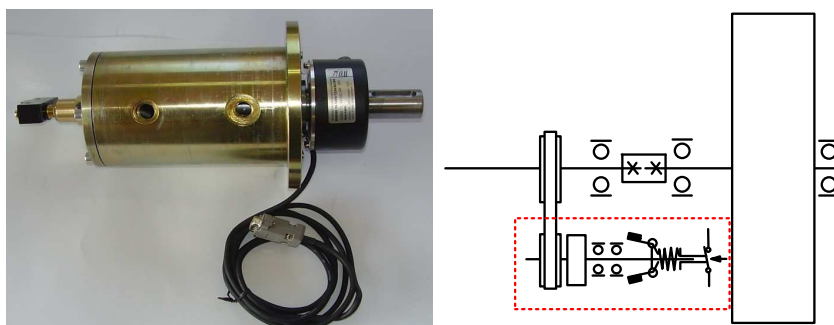
5.1 Zespół zabezpieczenia maksymalnych obrotów koła zamachowego

Zabezpieczenie przed przekroczeniem dopuszczalnych max obrotów masy wirującej, ustalonych na 4000 (I stopień) i 4500 obr/min (II stopień), jest realizowane przez dwustopniowy regulator bezpieczeństwa, w którym pierwszy stopień kontrolowany jest elektronicznie, a drugi mechanicznie – jego schemat i widok przedstawia rys. 6. Przyjęte granice uwzględniają margines bezpieczeństwa na poziomie 2000 obr/min.

Pomiar obrotów wału napędowego masy jest dokonywany pośrednio (poprzez przekładnię pasową) na wale napędzającym regulator odśrodkowy zespołu zabezpieczenia maksymalnych obrotów. Układ elektroniczny dokonuje pomiaru obrotów przy pomocy

enkodera, którego układ licznika powoduje zamknięcie przepustnicy silnika po przekroczeniu nastawy max obrotów.

Drugi stopień to układ mechaniczny wykorzystujący regulator odśrodkowy i mikrowyłącznik który odcina zasilanie wtryskiwaczy silnika po przekroczeniu max obrotów tego stopnia (jest to wartość 4500 obr/min – układ ten działa jako awaryjny w stosunku do pierwszego).



Rys. 6. Widok zespołu zabezpieczenia maksymalnych obrotów i jego schemat kinematyczny z fragmentem schematu stanowiska

5.2. Zabezpieczenie przed przekroczeniem maksymalnego momentu hamującego

Ze względu na możliwość wygenerowania przez hamulec tarczowy momentu hamującego o wartościach większych niż występujące podczas eksploatacji samochodu zdecydowano się ograniczyć wartość maksymalnego momentu hamującego do 4500 Nm, dającego efekt zatrzymania masy wirującej z opóźnieniem odpowiadającym ok. 1g podczas hamowania samochodu. Ma to na celu zabezpieczenie m. in. przekładni redukcyjnej przed przeciążeniem.

W tym układzie zastosowano również dwustopniowe zabezpieczenie. Jedno realizowane jest poprzez ograniczenie maksymalnego ciśnienia powietrza w układzie pneumatycznym.

Drugie realizowane jest przez zastosowanie sprzęgła bezpieczeństwa, w postaci sprzęgła palcowego, zrywalnego po przekroczeniu momentu zadziałania.

6. UKŁAD STEROWANIA

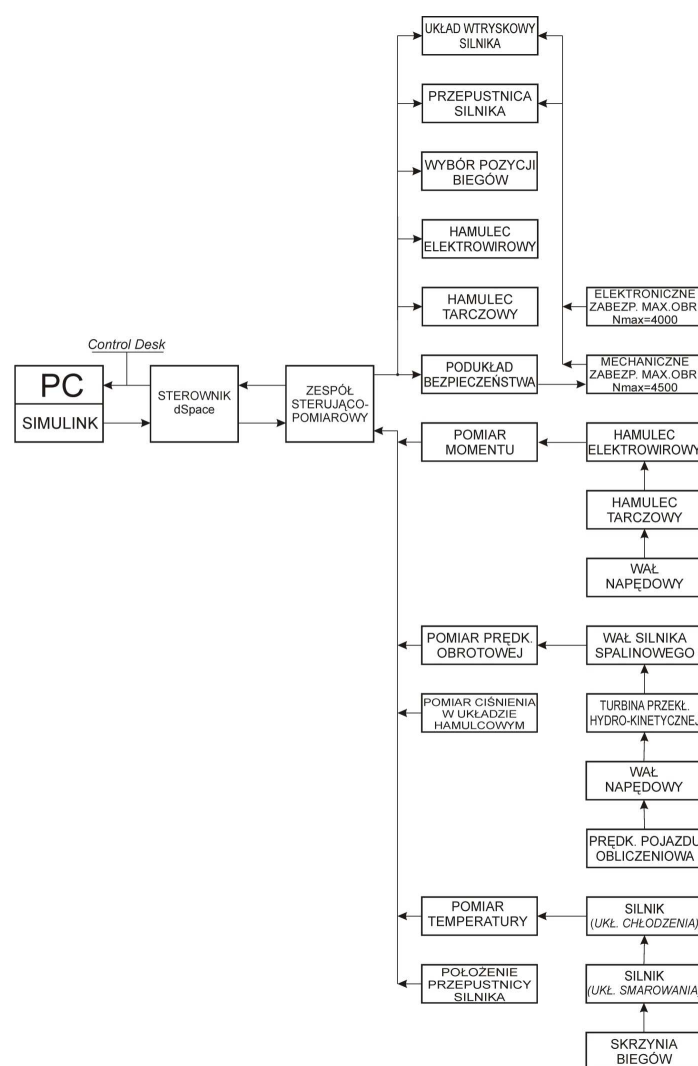
Układ sterowania pracą stanowiska składa się ze zespołów mechatronicznych, obsługujących podukłady stanowiska takie jak:

- przepustnicę silnika
- zmianę pozycji biegów
- zespół hamulca tarczowego
- hamulec elektrowirowy
- zespół bezpieczeństwa maksymalnych obrotów masy wirującej.

Współdziałanie układów sterujących, wykonawczych, pomiarowych, rejestrujących, kontrolnych i bezpieczeństwa jest realizowane w sposób przedstawiony na schemacie blokowym na rys. 7.

Układ ten działa w trybie sterowania automatycznego lub ręcznego. Sterowanie automatyczne może być realizowane wg opisanych dwóch sposobów prowadzenia symulacji, z użyciem systemu dSpace, w pętli sprzężenia zwrotnego.

Ręczne sterowanie podzespołami stanowiska pozwala na prowadzenie prezentacji poglądowych funkcjonowania stanowiska i prostych badań w zakresie pracy poszczególnych zespołów dla określenia ich parametrów i zależności.



Rys. 7. Schemat układu sterująco-pomiarowego

7. WŁASNOŚCI FUNKCJONALNE

Stanowisko zbudowane w przedstawiony wyżej sposób pozwala na realizację prac badawczych oraz testów o charakterze dydaktycznym dotyczących wielu aspektów związanych z analizą pracy układu napędowego oraz elementów wykorzystanych do budowy podukładu generowania momentu oporów ruchu.

W zakresie dynamiki układu napędowego możliwe jest badanie procesów dynamicznych w stanach przejściowych zachodzących w układzie napędowym. Wykorzystanie projektowanego oprogramowania symulacji prognostycznej i odtwarzającej pozwala na analizę realnych obciążeń układu napędowego samochodu osobowego w różnych stanach i warunkach ruchu – przykładowo: podczas dynamicznego przyspieszania, podczas jazdy z prędkością ustaloną, podczas pokonywania wzniesień, podczas jazdy w ruchu miejskim, pozamiejskim i autostradowym.

Zastosowanie w układzie generowania oporów ruchu ciernych hamulców tarczowych samochodu osobowego oraz retardera pozwala na wykorzystanie zindywidualizowanego sterowania tymi elementami do badań dynamiki i testów funkcjonalności tych elementów, co jest możliwe dzięki odpowiedniemu doborowi parametrów tych elementów, a także zastosowaniu w układzie napędowym koła zamachowego akumulującego energię kinetyczną.

Całość stanowiska badawczego posiada nowoczesną, mechatroniczną strukturę o znacznym udziale i znaczeniu programu sterującego w całościowym funkcjonowaniu stanowiska.

8. BIBLIOGRAFIA

- [1] Orzełowski S.: *Eksperymentalne badania pojazdów i ich zespołów*. Warszawa, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1995.
- [2] ZF Getriebe GmbH, *Technical description 5HP-18*
- [3] *Dane techniczne retardera elektrowirowego CFK-140* – materiały reklamowe firmy ZELU S.L.
- [4] 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,
- [5] 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.