

**Zakład Napędów Wieloźródłowych
Instytut Maszyn Roboczych Ciężkich**

Laboratorium Układów Napędowych

Ćwiczenie N1

**Dwuźródłowy układ napędowy z szybko-obrotowym silnikiem PM
oraz układ szeregowy sterowany za pomocą przekształtnika częstotliwości**

Data wykonania ćwiczenia.....

Data oddania sprawozdania.....

Zespół wykonujący ćwiczenie:

	<i>Nazwisko i imię</i>	<i>ocena</i>
1.
2.
3.
4.
5.
6.
7.
8.
9.
10.

Wydział SiMR PW

Rok ak. 20.../20...

Semestr.....

Grupa.....

Warszawa 2010r.

Cel i zakres instrukcji

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z działaniem

- dwóch laboratoryjnych układów napędowych:
 - z dwuzródłowym układem napędowym z szybko-obrotowym silnikiem z magnesami trwałymi PM,
 - z układem napędowym sterowanym przekształtnikiem częstotliwości (falownikiem) z możliwością zwrotu energii do akumulatora elektrochemicznego,
- oraz z telemetrycznym systemem firmy ESA Messtechnik GmbH do komputerowej akwizycji danych pomiarowych.

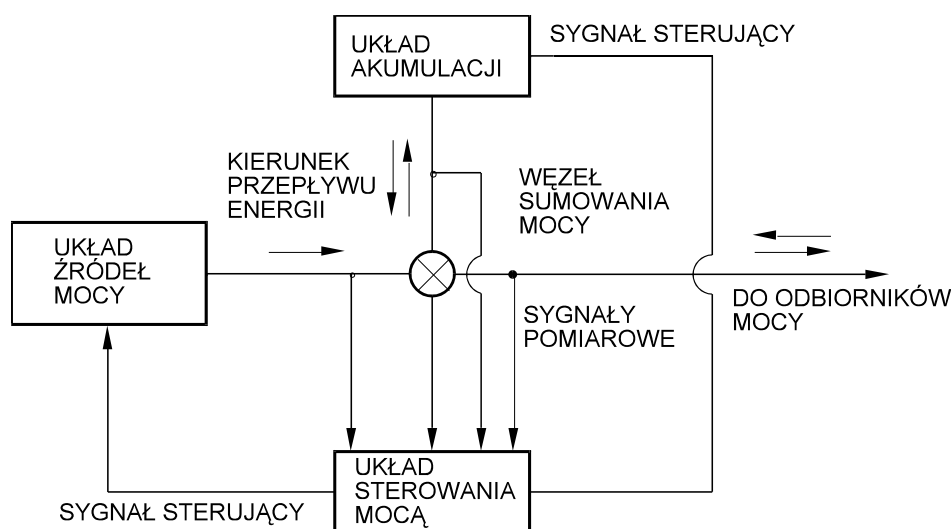
Na podstawie zarejestrowanych przebiegów wielkości elektrycznych i mechanicznych zostanie przeprowadzona wstępna analiza energetyczna napędów pod kątem oceny wielkości odzysku energii do akumulatora elektrochemicznego lub inercyjnego (dla napędu dwuzródłowego) dla różnych wariantów sterowania układami napędowymi.

1. Wieloźródłowe układy napędowe

Podstawowym elementem w wieloźródłowych układach napędowych jest źródło energii. Źródła energii można podzielić na trzy kategorie:

- **źródła pierwotne**, źródła energii o możliwie stałym wydatku, dostarczające energię do układu niezależnie od przemian zachodzących w tym układzie. Następuje w nich nieodwracalny proces przemiany energii pobieranej z otoczenia maszyn (energii chemicznej, elektrycznej, mechanicznej) w typ energii, która jest przenoszona w zespole napędowym, a ich przykładem może być silnik cieplny, silnik elektryczny, turbina gazowa, turbina wodna itp. Są to źródła dodatnie.,
- **źródła wtórne**, mające tę cechę, że mogą pracować przemiennie - jako dodatnie bądź ujemne źródła energii. Następuje w nich odwracalne magazynowanie energii i są to różnego rodzaju akumulatory (elektrochemiczne, hydrauliczne, mechaniczne itp.),
- **odbiorniki energii**, źródła ujemne, odbierające energię z układu. Następuje w nich rozpraszanie energii (elementy dyssypatywne w układzie) bądź zamiana energii na wykonywaną pracę (układy wykonawcze maszyny).

Wieloźródłowy układ napędowy musi ponadto zawierać sterowane w sposób ciągły urządzenia do rozdziału lub sumowania strumieni mocy pochodzących z różnych źródeł energii. Stanowią je zestawy przekładni o stałym i zmiennym przełożeniu. Przekładnie stałe, to reduktory lub multiplikatory (zależnie od zwrotu strumienia mocy) oraz mechanizmy różnicowe. Przekładnie o zmiennym przełożeniu, to mechaniczne przekładnie wielostopniowe ze sprzęgłami, przekładnie obiegowe o dwóch stopniach swobody, przekładnie hydrokinetyczne, hydrostatyczne, elektryczne itp. Ogólnie biorąc w takim układzie energia jest odbierana z węzła sumującego chwilowe moce pierwotnego źródła i akumulatora. Układ musi więc zawierać automatyczne sterowanie regulujące przepływ energii. Ogólną strukturę układu wieloźródłowego przedstawiono na rys.1-1.



Rys.1-1 Struktura wieloźródłowego systemu energetycznego z akumulacją energii

Akumulacja energii zawiera w sobie też jej rekuperację, która jest możliwa w trakcie hamowania odzyskowego elementów inercyjnych układu napęd-odbiornik, charakteryzujących się znaczną początkową wartością energii kinetycznej, lub też odzysku

energii potencjalnej opuszczanego ciężaru. Jest to istotna cecha wyróżniająca wieloźródłowe napędy z akumulacją energii.

2. Podstawowe komponenty układu napędowego

2.1. Silnik elektryczny PM

Silniki synchroniczne do niedawna nie znajdowały szerokiego zastosowania w napędach pojazdów ze względu na duże trudności w rozruchu i regulacji ich prędkości obrotowej. Jednak rozwój nowoczesnych układów sterowania częstotliwością sygnałów napięciowych zmienił tę sytuację. Obecnie nowoczesne kontrolery potrafią wygenerować i w sposób płynny zmieniać sygnały napięciowe o bardzo szerokim spektrum częstotliwości, niemal dowolnej, zadanej amplitudzie i przesunięciu fazowym. Dzięki sprzężeniu zwrotnemu kontrolera z silnikiem synchronicznym (z silnika do kontrolera przekazywany jest sygnał informujący o bieżącej prędkości i położeniu geometrycznym wału silnika) zespół silnik synchroniczny-kontroler staje się cennym i coraz częściej stosowanym elementem układów napędowych pojazdów hybrydowych i elektrycznych.

Wśród silników synchronicznych szczególną uwagę należy zwrócić na silniki, w których stały strumień magnetyczny wytwarzany jest przez magnesy trwałe, a nie przez zasilane z zewnątrz uzwojenia. Brak konieczności wytwarzania stałego strumienia magnetycznego poprzez przepływ prądu przez uzwojenia powoduje wzrost sprawności silników z magnesami trwałymi (PM) w porównaniu do tradycyjnych silników synchronicznych.

W silnikach PM stały strumień magnetyczny jest wytwarzany przez odpowiednio zamocowane (naklejone) magnesy trwałe. Mimo niezaprzeczalnych zalet (wytwarzają stały strumień magnetyczny bez pobierania prądu z zewnątrz) posiadają one jedną wadę – w wysokich temperaturach ($\sim 170-200^{\circ}\text{C}$) tracą swoje właściwości magnetyczne. Dlatego też silniki wykorzystywane do napędzania pojazdów muszą być wyposażone w układy wymuszonego chłodzenia powietrzem, a w przypadku dużych mocy – cieczą. Takie rozwiązanie (chłodzenie powietrzem) zastosowane zostało w silniku PM Unique Mobility o mocy 18.2 kW, w jaki wyposażone jest stanowisko laboratoryjne.



Rys.2-1. Silnik PM z kontrolerem

Funkcją kontrolera jest przejście informacji o aktualnej prędkości obrotowej i geometrycznym położeniu wału silnika (sygnały te generowane są przez wbudowany w silnik czujnik), następnie porównanie zmierzonych wartości z zadaną przez użytkownika prędkością obrotową (lub zadaną intensywnością hamowania) i na tej podstawie wygenerowanie trójfazowego napięcia zasilającego uzwojenia silnika o odpowiednich parametrach: amplitudzie, częstotliwości i przesunięciu fazowym względem magnetycznej osi głównej silnika.

Kontroler silnika PM wyposażony jest również w funkcję ograniczania prądu silnika w przypadku gdy temperatura układów prądowych kontrolera lub uzwojeń silnika przekracza dopuszczalny poziom. Wartość temperatury dopuszczalnej kontrolera określono jako 70⁰C, a uzwojeń stojana silnika 120⁰C (temperatury te mierzone są przy pomocy termopar). Jeżeli którakolwiek z tych temperatur zostanie przekroczona kontroler zredukuje wartość prądu tak, aby temperatury te nie zostały przekroczone. Limitowanie prądu prowadzi jednak do obniżenia sprawności silnika, dlatego należy unikać pracy układu w okolicach maksymalnych, dopuszczalnych temperatur. Pomagać ma w tym przystosowanie konstrukcji silnika PM do warunków wymuszonego chłodzenia powietrzem.

Sterowanie pracą silnika odbywa się poprzez zadanie poziomu sygnałów sterujących, które docierają do kontrolera. Najważniejsze sygnały to: włączenie/wyłączenie układu, kierunek obrotów, zadawana prędkość obrotowa i intensywność hamowania. Poniżej szczegółowo omówione zostały sygnały: prędkości obrotowej i intensywności hamowania.

Zadana prędkość:

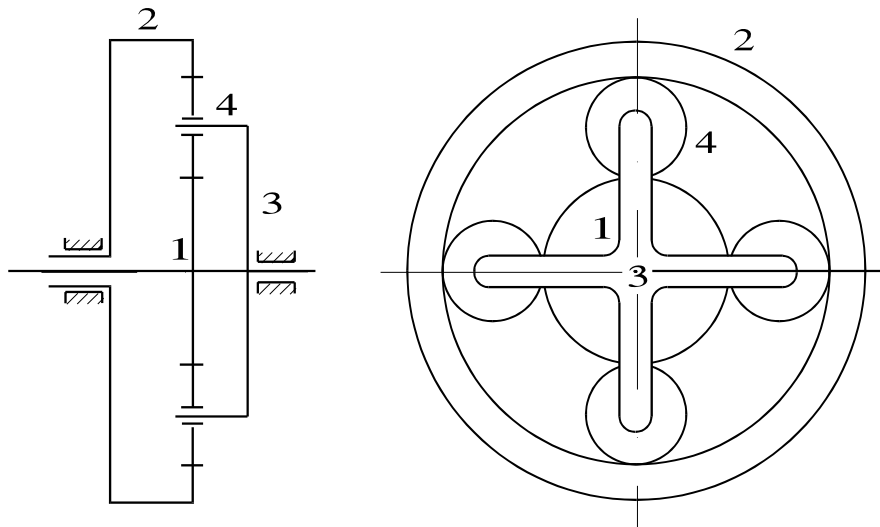
Sygnał zadanej prędkości przyjmuje wartości z przedziału +10V,-10V DC, jego zadaniem jest przekazywanie zadawanej wartości prędkości obrotowej i jej kierunku. Sygnał ten jest odpowiednikiem pozycji pedału gazu w samochodzie - +10V oznacza pracę silnika z maksymalną prędkością z prawym kierunkiem obrotów, -10V -z maksymalną prędkością z lewym kierunkiem obrotów, 0 V –oznacza postój.

Hamowanie odzyskowe:

Sygnał hamowania przeznaczony jest do sterowania poprzez kontroler intensywnością hamowania odzyskowego (dozwołonym, dopuszczalnym opóźnieniem hamowania). W trakcie hamowania odzyskowego prąd generowany przez silnik będzie przyjmował wartość nie większą, niż wartość wynikającą z ustawionej intensywności hamowania. W miarę zmniejszania prędkości obrotowej wału silnika generowany prąd będzie również zmniejszał swoją wartość, aż osiągnie wartość zerową przy zatrzymaniu silnika. Oczywiście zadanie mniejszej intensywności hamowania spowoduje obniżenie wartości odzyskiwanego prądu i wydłuży czas hamowania. Możliwa jest również sytuacja, że silnik będzie hamował jedynie pod wpływem momentów oporu (wybieg), zdarzy to się gdy silnik wypadnie z synchronizmu. Sygnał hamowania przyjmuje wartości +1V DC dla zerowego prądu hamowania, aż do -10V DC dla najbardziej intensywnego hamowania.

2.2. Przekładnia planetarna

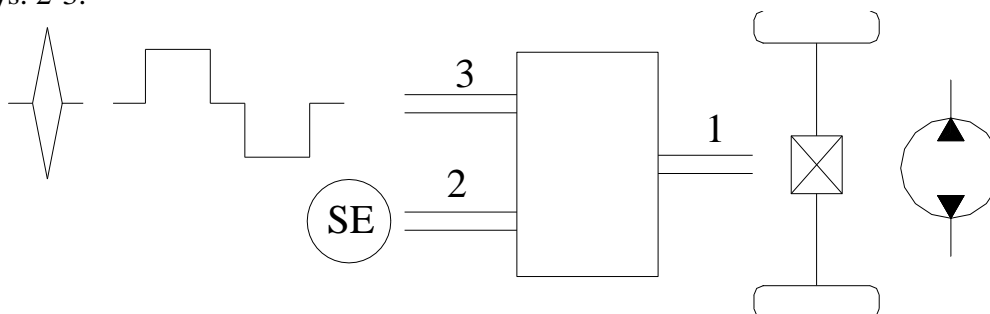
Przekładnia obiegowa w napędzie hybrydowym pełni rolę rozdzielacza mocy. Najczęściej stosowany jest pojedynczy szereg planetarny o strukturze kinematycznej jak na rys. 2-2.



Rys.2-2 Schemat pojedynczej przekładni planetarnej

Ogniwo 1, zwane *kołem centralnym* lub *słonecznym*, oraz ogniwo 2 (*koło koronowe*) są ogniwami centralnymi przekładni obiegowej. Ogniwia centralne zazębiają się z ogniwem 4 (*kołem obiegowym* lub *satelitą*) które jest kołem zębatym o ruchomej osi. W praktyce najczęściej stosuje się przekładnie o trzech lub czterech satelitach rozmieszczonych symetrycznie względem głównej stałej osi obrotu $O-S$. Ogniwo 3 (*jarzmo obrotowe*) prowadzące ruchomą oś obrotu $O-R$, stanowi wraz z satelitą trzecią parę obrotową przekładni obiegowej. Jarzmo, koło słoneczne i koło koronowe stanowią ogniwa podstawowe przekładni obiegowej.

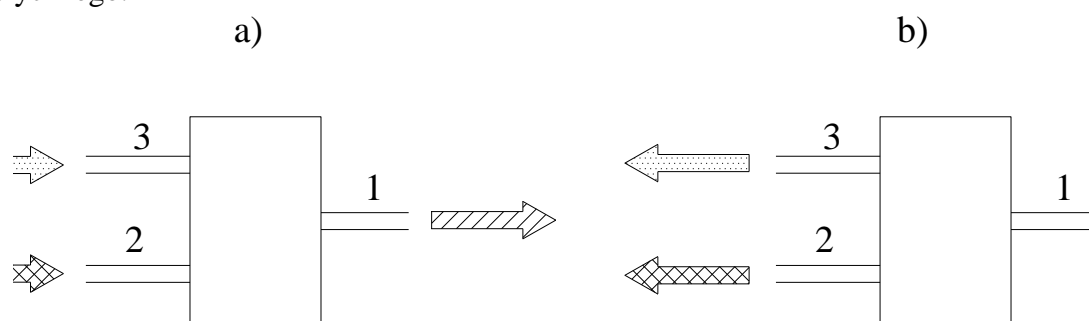
W napędach hybrydowych wał jarzma połączony jest z układem odbioru mocy tj. przenosi moc na koła jezdne pojazdu lub połączony jest z pompą hydrauliczną układu roboczego. Wał koła słonecznego jest połączony z silnikiem spalinowym lub akumulatorem inercyjnym, zaś koło koronowe jest napędzane (lub hamowane) przez silnik elektryczny – patrz rys. 2-3.



Rys. 2-3. Zabudowa przekładni obiegowej w napędzie hybrydowym

Jest to przekładnia typu CVT (o ciągłej zmianie przełożenia) w której wszystkie wały są ruchome, dzięki czemu - uzyskując dodatkowy stopień swobody - przez aktywne hamowanie koła koronowego można w sposób ciągły zmieniać przełożenia między wałami. W celu kinematycznego dopasowania do elementów współpracujących, tj. silnika elektrycznego, akumulatora inercyjnego i układu odbioru mocy, na wszystkich wałach wyjściowych mogą być zabudowane dodatkowe reduktory o osiach stałych.

Wał jarzma w takiej przekładni jest bądź wałem sumującym bądź różnicującym, jeśli chodzi o przepływ mocy. Przypadek pierwszy zachodzi podczas przekazywania mocy do układu odbioru mocy, gdy moc z silnika spalinowego (lub akumulatora inercyjnego) jest sumowana z mocą silnika elektrycznego. Przypadek drugi – zachodzi podczas hamowania rekuperacyjnego; silnik elektryczny przechodzi wówczas w tryb pracy generatorowej i moc płynie z wału jarzma na wał koła koronowego oraz na wał koła słonecznego (w przypadku akumulatora inercyjnego). Rozdział tej mocy między koło słoneczne i koronowe zmienia się w sposób ciągły w zależności od wielkości momentu hamującego ze strony silnika/generatora elektrycznego.



Rys.2-4. Schemat przepływu mocy w przekładni obiegowej; a- przypadek rozpędzania pojazdu, b- przypadek hamowania pojazdu

Podstawowym parametrem przekładni obiegowej jest przełożenie bazowe „ i_0 ”, określone jako stosunek prędkości kątowej koła słonecznego do prędkości koła koronowego przy zatrzymanym wale jarzma:

$$i_0 = \frac{\omega_2}{\omega_3} \quad \text{dla } \omega_1 = 0$$

W przypadku napędu hybrydowego z silnikiem spalinowym, przełożenie bazowe przekładni obiegowej wynosi zwykle 2–3. Wyższe przełożenia bazowe są wymagane gdy mamy do czynienia z napędem elektrycznym i akumulatorem inercyjnym zabudowanym na wale koła słonecznego – przy czym w przypadku konieczności stosowania przełożeń wyższych niż 6,7, z uwagi na rozmiary przekładni, stosuje się wtedy podwójny szereg planetarny.

2.3. Akumulator inercyjny

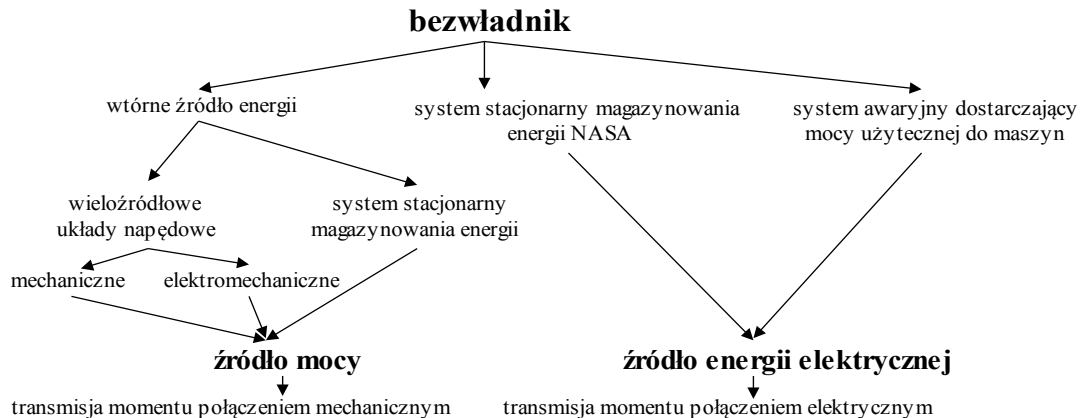
W układach elektro-mechanicznych, lub hydro-mechanicznych, z uwagi na dużą moc właściwą oraz ograniczoną jedynie względami technicznymi właściwą pojemność energetyczną, coraz większe zastosowanie znajdują akumulatory inercyjne - zwane też żyroskopowymi. Akumulator taki stanowi wirujący z dużą prędkością bezwładnik w postaci bryły obrotowej, który podczas jego rozpędzania akumuluje energię kinetyczną, zaś w czasie hamowania, energię tę oddaje. Obecna technologia pozwala na konstruowanie urządzeń nie mających w praktyce wiele wspólnego z klasycznym kołem zamachowym, ciężkim i pracującym przy niskiej prędkości obrotowej (2 - 4 tys. obr/min). Stosowane tworzywa kompozytowe, nowe rozwiązania łożyskowania (magnetyczne lub na poduszce powietrznej) oraz hermetyczne obudowy próżniowe - powodują że osiągalne są prędkości wirowania rzędu 60 - 80 tys. obr/min przy niewielkiej masie bezwładnika. Umożliwia to uzyskanie wysokich gęstości zgromadzonej energii, która może być szybko oddana do układu napędowego.

Istnieją dwa podstawowe kierunki zastosowania bezwładników:

- jako źródło mocy (dostateczna gęstość energii przy bardzo dużej gęstości mocy, z wykorzystaniem umiarkowanych prędkości obrotowych oraz maksymalnej energii,

elementem transmitującym moment jest wał mechaniczny wyprowadzony z uszczelnionej obudowy podciśnieniowej),

- jako źródło energii elektrycznej (substytut baterii elektrochemicznej), z wykorzystaniem wysokich prędkości obrotowych, przewodów elektrycznych zapewniających (teoretycznie) wysokie podciśnienie w obudowie bez konieczności użycia pompy molekularnej.



Rys. 2-5. Zastosowanie bezwładników

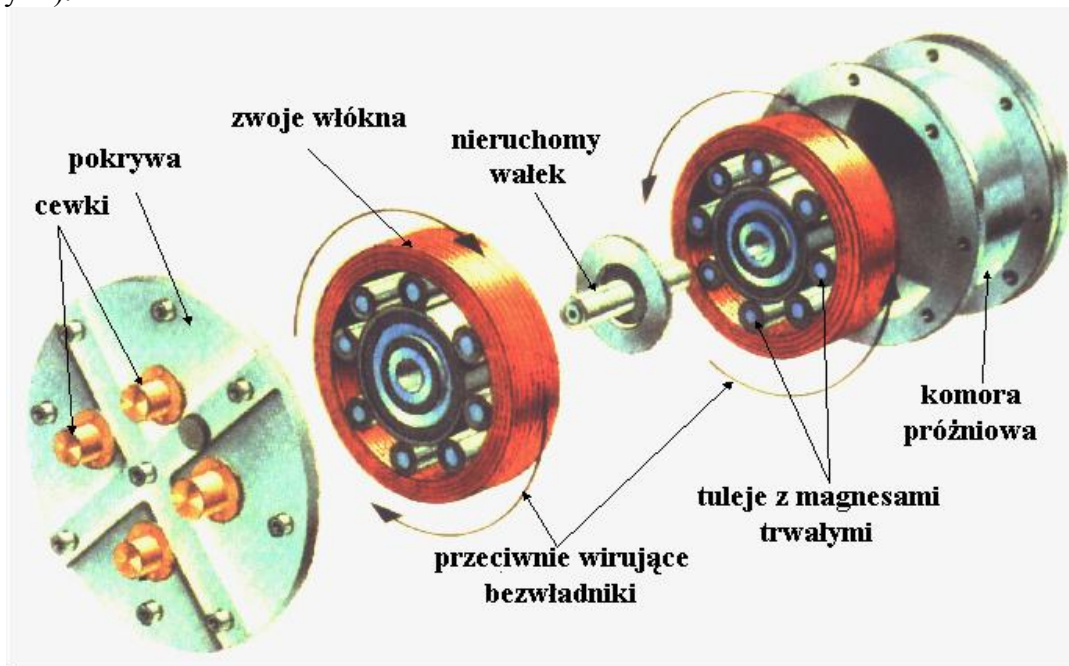
Przykładem pierwszej postaci (źródło mocy) jest konstrukcja Garrett'a (por. Tab. 2-1) wraz z pompą molekularną podtrzymującą podciśnienie w obudowie bezwładnika (moc ~ 70 kW)

Tablica 2-1. Dane charakterystyczne dla rzeczywistego bezwładnika konstrukcji Garrett

<p>Charakterystyka pompy molekularnej</p>	Energia całkowita	1 kWh
	Średnica zewnętrzna obęczy	0.584 m
	Średnica wewnętrzna obęczy	0.489 m
	Szerokość obęczy	0.107 m
	Prędkość pracy	25000 obr/min
	Ciężar obęczy	12.701 kg
	Materiał	Kewlar, włókno szklane
	Całkowita masa wirnika	27.216 kg
	Materiał piasty	7075 Aluminium
	Podciśnienie	1 ... 10 μ HgA
	Straty aerodynamiczne	$0.1 \cdot 10^{-7} \text{ Nms}^2$
	Straty w łożyskach	0.1 Nm

Przykładem drugiej postaci jest opatentowane w USA (patent 512460523) urządzenie osiągające prędkość 20 000 rad/s i przetwarzające energię mechaniczną na elektryczną i odwrotnie, poprzez indukowanie w cewkach wbudowanych w obudowę bezwładnika napięcia

wywołanego polem magnetycznym wirującego wirnika (część bezwładnika z magnesami trwałymi).



Rys. 2-6. Podstawowy moduł akumulatora mechaniczno – elektrycznego

Przedstawiony moduł akumulatora mechaniczno – elektrycznego złożony jest z dwu przeciwie wirujących bezwładników kompozytowych o zewnętrznej średnicy 0.5 m i masie 15 kg, zamocowanych na wale na łożyskach magnetycznych.

2.4. Akumulator elektrochemiczny

Głównymi parametrami określającymi wartości chemicznego źródła prądu w pojeździe elektrycznym są:

- energia właściwa [kW/kg],
- żywotność cykliczna,
- cena 1Ah lub 1Wh.

Podstawowymi układami elektrochemicznymi, rozpatrywanymi pod kątem zastosowania w pojazdach są:

- Ołowiowo – kwasowy (Pb/PbO₂)
- Niklowo – kadmowy (NiCd)
- Niklowo – wodorkowy (NiMH)
- Litowo – jonowy (Li-jon)
- Litowo – polimerowy (Li-polimer)
- Ogniwa paliwowe.

Ogniwa ołowiowo-kwasowe są najlepiej poznanym o najdłuższej historii aplikacyjnej chemicznym źródłem prądu. Z uwagi na konstrukcję i zastosowanie można wyróżnić następujące typy ogni:

- stacjonarne (z płytą pancerną) mające szerokie zastosowanie w telekomunikacji, o dużych układach zasilania awaryjnego (siłowniach),
- trakcyjne do zasilania napędów elektrycznych (melexy, widłowe, pojazdy w kopalniach),
- rozruchowe mające zastosowanie w przemyśle motoryzacyjnym,

- VRLA mające zastosowanie w zasilaniu elektroniki przenośnej, zasilaczach awaryjnych UPS,
- bipolarne obecnie na etapie badań.

Pomimo licznych osiągnięć w dziedzinie rozwoju ogniw ołowiowo-kwasowych, które doprowadziły do uzyskania wysokich wydajności materiałów elektrodowych (Ah/kg) oraz obniżeniu rezystancji wewnętrznej głównym czynnikiem limitującym dalszy wzrost wydajności energetycznej jest wysoki udział materiału elektrodowego w całkowitej masie elektrody, który stanowi 40-45%

Próby rozwiązania tego problemu idą w kierunku prowadzenia prac nad ogniwami o konstrukcji bipolarnej, dla których tradycyjny materiał nośnika (kratki) miałby być zastąpiony przewodzącym elektronowo kompozytem polimerowym.

W obecnej chwili, najbardziej obiecującym i szeroko wykorzystywanym źródłem energii w pojazdach elektrycznych jest ogniwo typu VRLA, czyli akumulator szczelny, regulowany zaworem z wewnętrzną rekombinacją gazów. W akumulatorach typu VRLA dokonano unieruchomienia elektrolitu poprzez jego zżelowanie lub w ogniwach typu VRLA - AGM zastosowanie jako separatora maty szklanej absorbującej elektrolit wewnątrz porowatej struktury.

Akumulatory nikiowo-kadmowe podobnie jak akumulatory ołowiowo-kwasowe są układem elektrochemicznym znanym i stosowanym od wielu lat. W porównaniu z układem ołowiowo-kwasowym ogniwa niklowo-kadmowe charakteryzują się wyższą energią właściwą, lepszą charakterystyką prądową w niskich temperaturach oraz większą żywotnością cykliczną. Pomimo tego aplikacja tego układu np. do rozruchu silników spalinowych blokowana jest przez wysoką cenę ogniw, jak również wprowadzenie do obiegu dużych ilości kadmu. Układ niklowo-kadmowy z powodzeniem stosowany jest obecnie w wyrobach specjalnych, głównie w lotnictwie i systemach zasilania do celów militarnych. W ostatnich czasach akumulatory niklowo-kadmowe małowabarytowe przeznaczone głównie do zasilania elektroniki przenośnej wyparte zostały przez akumulatory niklowo-wodorkowe i litowe.

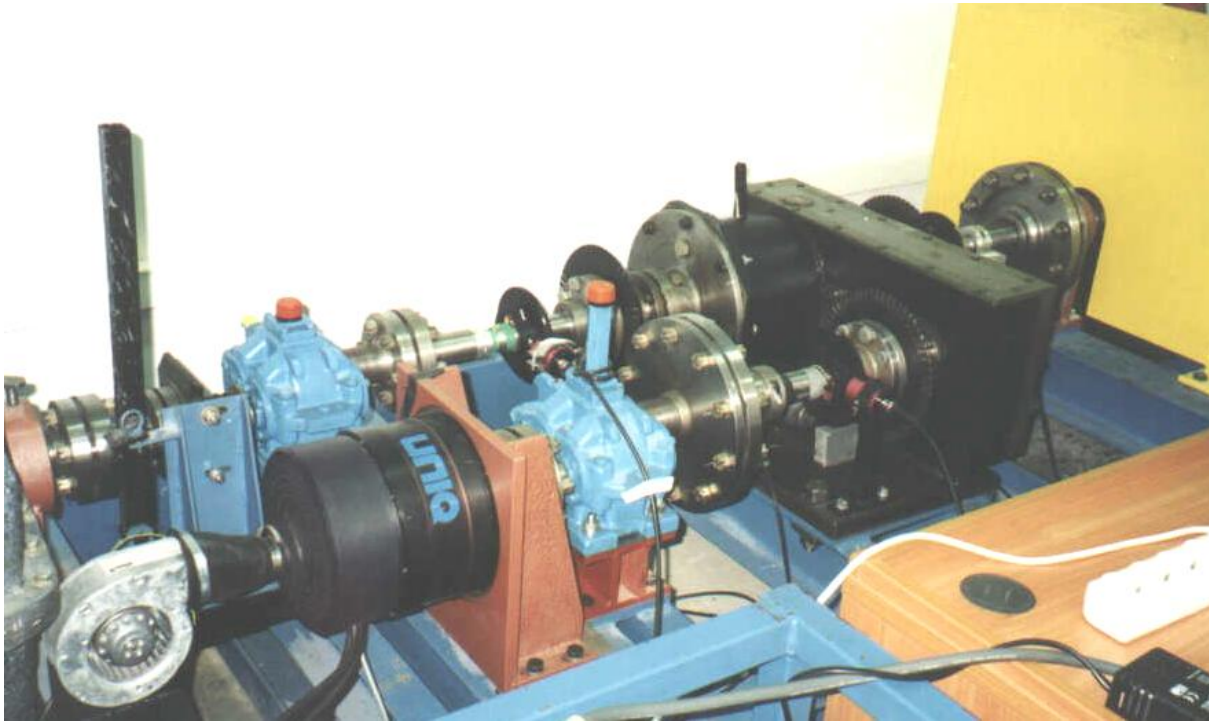
Z uwagi na rozwiniętą technologię wywarzania, jak i dostępność do surowców, akumulatory niklowo-kadmowe stosowane już były w wielu prototypach pojazdów zarówno z napędem elektrycznym, jak i hybrydowym.

Akumulatory niklowo-wodorkowe są w ostatnich czasach jednym z najszybciej rozwijającym się układów elektrochemicznych. Oferują wyższą energię właściwą w porównaniu z ogniwami niklowo-kadmowymi, Co znalazło szczególne odbicie w dużej komercjalizacji układu Ni-MH w zastosowaniu w telefonii komórkowej, komputerach typu palmtop i notebook. Dziabanie ogniwa Ni-MH polega na tym iż, w trakcie jego ładowania wodór H wytworzony w reakcji z elektrolitem ulega zwi4zaniu ze stopem metali M (proces redukcji) stanowiącym elektrodę ujemną, natomiast na elektrodzie dodatniej zachodzi utlenianie wodorotlenku niklu $Ni(OH)_2$ do postaci $NiOOH$, na skutek oddysocjowania jonu wodorowego H^+ .

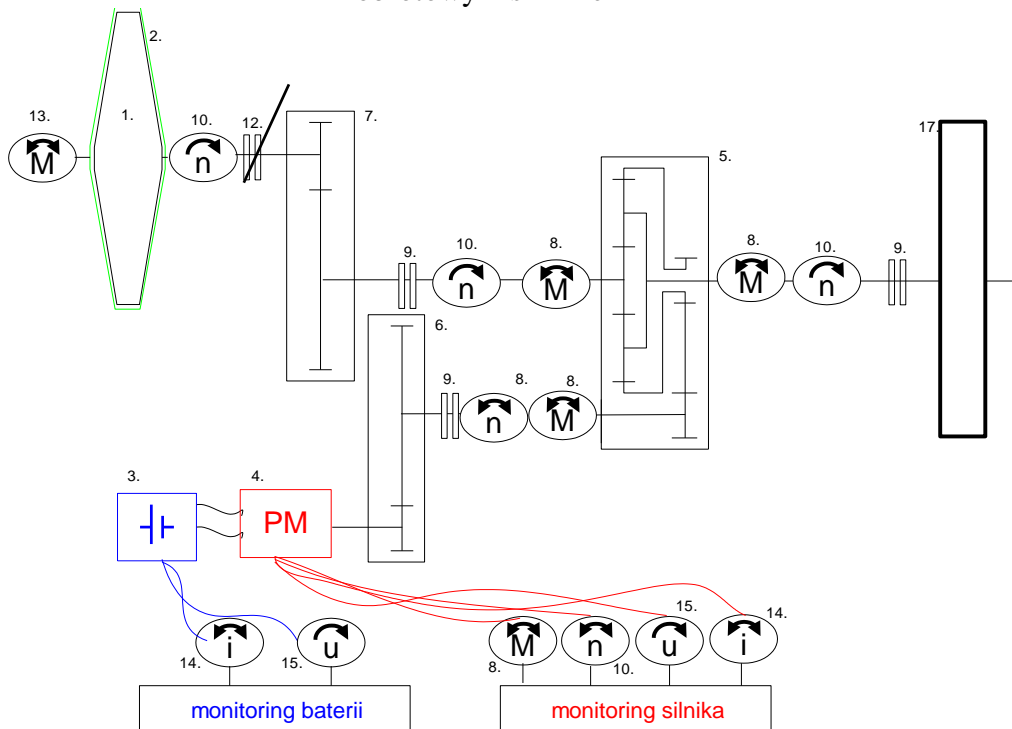
Baterie typu Ni-MH zostały już z powodzeniem zastosowane jako źródło energii w samochodach elektrycznych. Niewątpliwą wadą tego typu układu jest jego wysoki koszt. Do wad układów Ni-Cd i Ni-MH należy również zaliczyć niskie napięcie pojedynczych ogniw wynoszące 1,2 V.

Akumulatory litowo-jonowe stanowią kolejny wielce obiecujący układ elektrochemiczny z przeznaczeniem do napędu pojazdów elektrycznych. Podstawową zaletą tego układu jest wysokie napięcie pojedynczego ogniwa wynoszące 3,6 V, Co implikuje dużą energię właściwą wynoszącą do 150Wh/kg.. Firma SAFT, realizując europejski program badawczy zainicjowany w 1993 roku opracowała i wdrożyła układ litowo-jonowy,

3. Dwuzródłowy układ napędowy z szybko-obrotowym silnikiem PM



Rys.3-1. Fotografia stanowisko do badań dwuzródłowego układu napędowego z szybko-obrotowym silnikiem PM

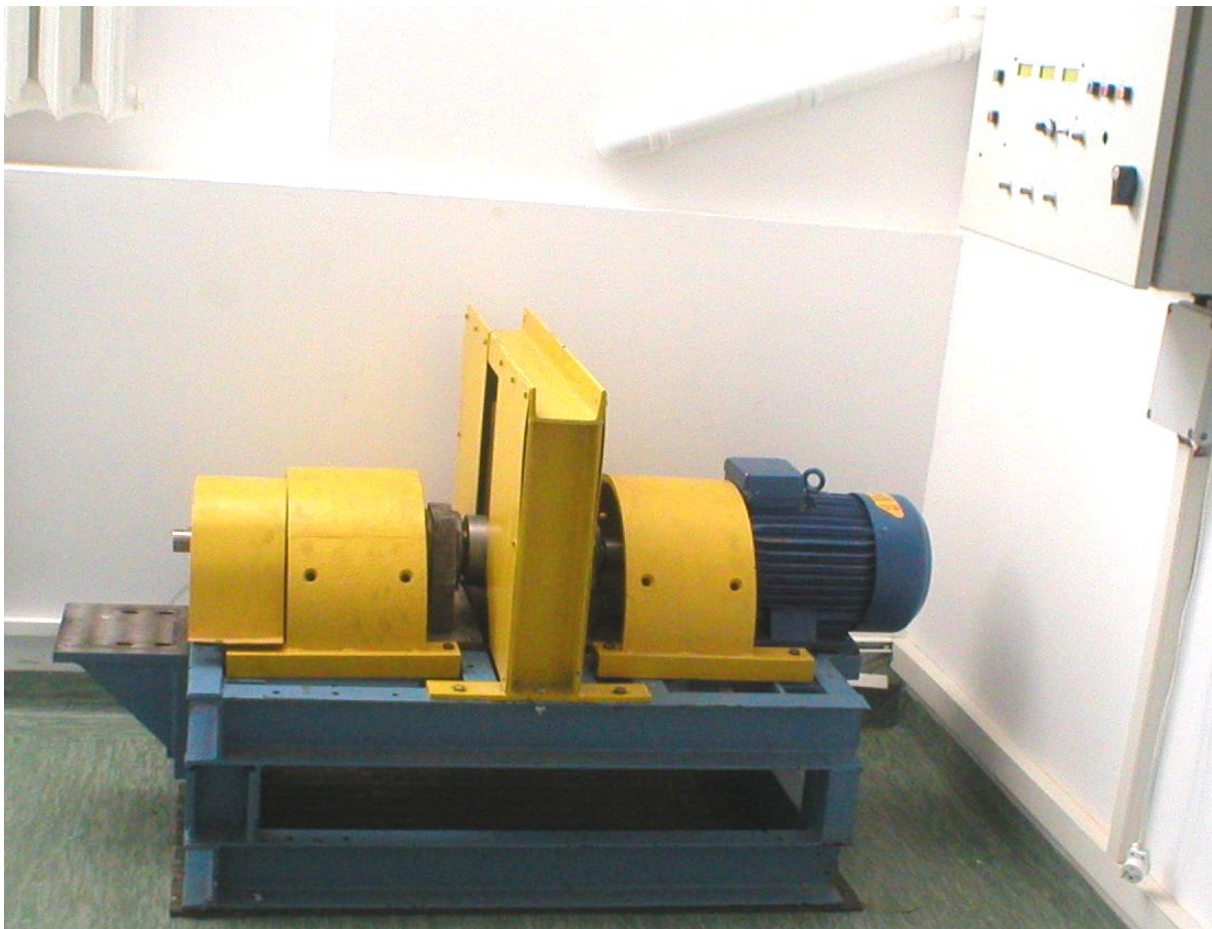


Rys.3-2. Schemat blokowy stanowiska laboratoryjnego z zaznaczeniem punktów pomiarowych

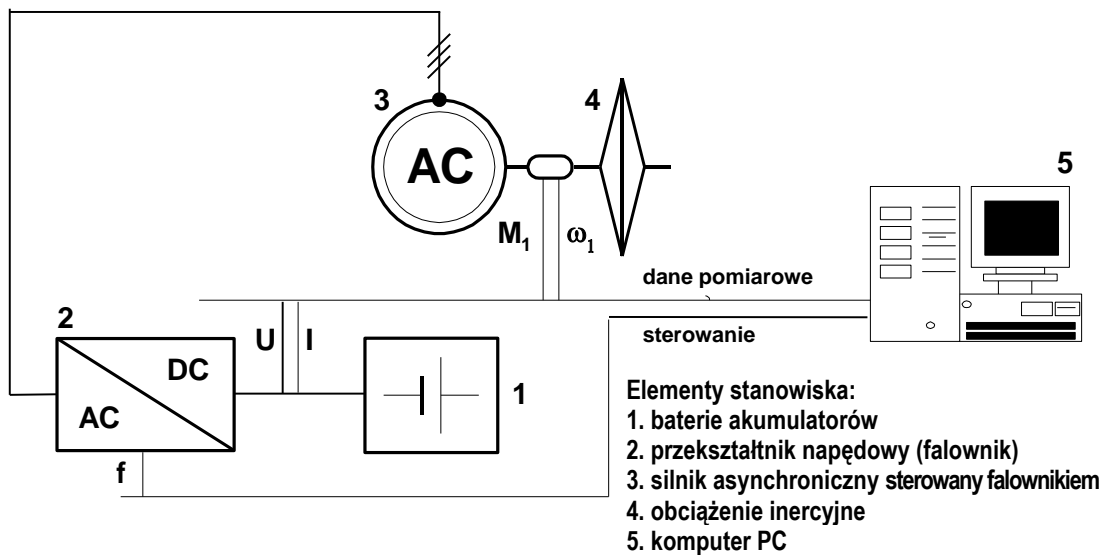
Schemat stanowiska laboratoryjnego odwzorowujący napęd dwuzródłowy z szybko-obrotowym silnikiem PM przedstawiono za pomocą bloków najważniejszych elementów (Rys.3-2). Kompletnie stanowisko laboratoryjne przystosowane do zamontowania uszczelnień

próżniowych składa się z bezwładnika kompozytowego (moment bezwład. - 0.261 kgm^2) w kształcie stożka wraz z „kołyską” (możliwość pomiaru momentu strat w łożyskach) **1**, obudowy kompozytowej **2**, baterii elektrochemicznej (85Ah, 72V) **3**, silnika PM (7500 obr/min, 75V, 256A) **4**, obciążenia odwzorowującego samochód osobowy (4.11 kgm^2) **17**, sprzęgieł **9**, momentomierzy telemetrycznych **8**, czujników prędkości obrotowej **10**, wolnego koła – zabezpieczenie mechaniczne przed obrotami wału jarzma w kierunku umownych prędkości ujemnych **11**, sprzęgła kłowego rozłączającego bezwładnik w celu wyznaczenia jego czasu wybiegu **12**, momentomierza do pomiaru momentu strat bezwładnika **13**, reduktora jednostopniowego pomiędzy bezwładnikiem i kołem słonecznym ($i = 2.7$) **7**, reduktora jednostopniowego pomiędzy maszyną elektryczną i kołem koronowym ($i = 3.7$) **6**, oraz przekładni planetarnej ($i_b = 2.96$) **5**, czujnika prądu **14**, czujnika napięcia **15**.

4. Szeregowy napęd z silnikiem indukcyjnym sterowanym falownikowo

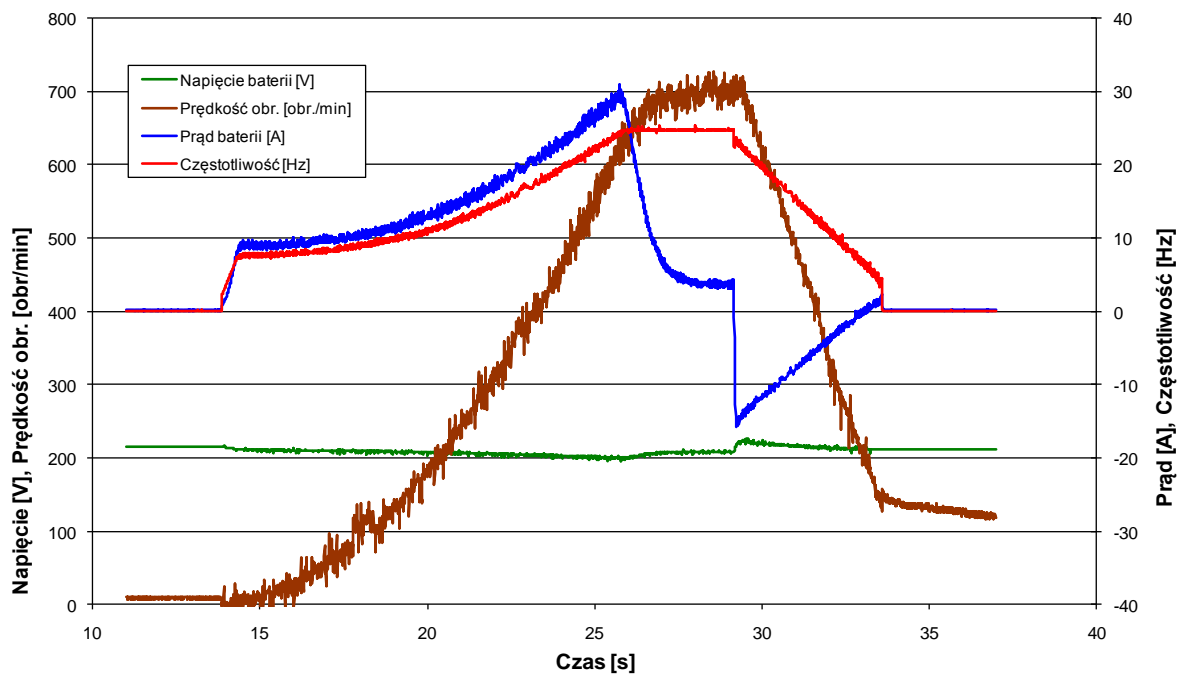


Rys. 4-1. Fotografia napędu szeregowego



Rys. 4-2. Schemat napędu szeregowego z zaznaczeniem elementów pomiarowych

Szeregowy układ napędowy



Rys. 4-3. Przykładowe przebiegi napięcia U , prądu baterii I oraz prędkości obrotowej wału silnika/bezwładnika n dla zadanej funkcji sterowania częstotliwością pola wirującego f

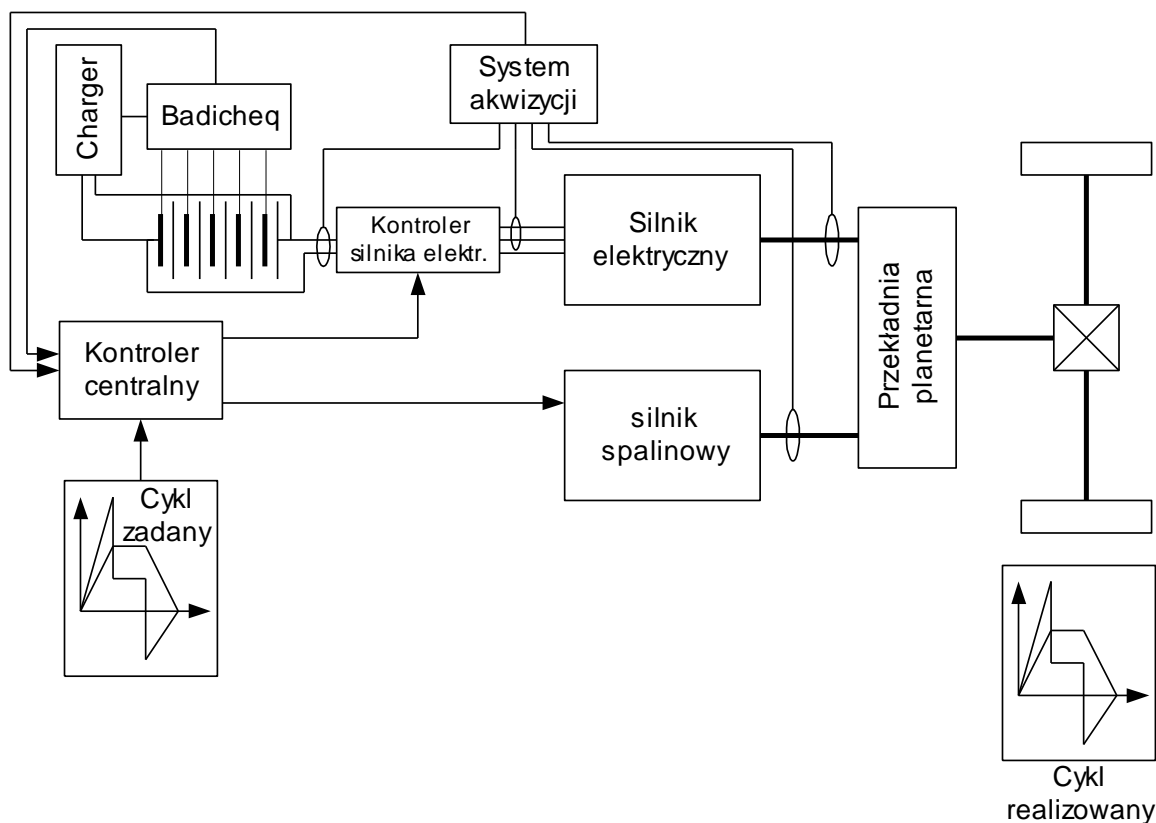
5. Telemetryczny system do akwizycji danych pomiarowych

Napędy pojazdów hybrydowych (wieloźródłowych) ze względu na złożoną budowę i wymagania dotyczące niskiego zużycia paliwa, wymagają precyzyjnego sterowania podczas realizacji cyklu jazdy. Funkcja sterowania x' musi uwzględniać oprócz funkcji wymuszeń $u(t)$ również precyzyjnie sformułowaną funkcję stanu $x(t)$. Dlatego precyzyjny monitoring parametrów mechanicznych i elektrycznych elementów układu napędowego odgrywa w napędach hybrydowych bardzo ważną rolę.

$$\dot{x} - f(x(t), u(t)) = 0$$

Znajomość funkcji stanu całego układu oraz wymuszeń pozwala określić odpowiednią funkcję sterowania realizującą określony cel np. minimalizację zużycia paliwa przy założeniu, że poziom naładowania baterii po zakończeniu jazdy będzie taki sam jak przy rozpoczęciu cyklu jazdy.

Poniżej zaprezentowany jest schemat ideowy hybrydowego układu napędowego pojazdu z uwzględnieniem systemu monitoringu rejestrującego parametry mechaniczne (momenty i prędkości obrotowe poszczególnych wałów przekładni planetarnej) i elektryczne (napięcie międzyprzewodowe i prąd fazowy na fazach silnika Permanent Magnet, napięcie i prąd baterii akumulatorów oraz poziom naładowania baterii).



Rys. 5-1. Schemat ideowy hybrydowego układu napędowego pojazdu z uwzględnieniem systemu monitoringu

W celu określenia najważniejszych funkcji sterowania pracą silników wieloźródłowego układu napędowego, przy określonych warunkach jazdy, konieczne jest przeprowadzenie szeregu testów laboratoryjnych, spośród których wybiera się te, dla których

osiągnięto najlepsze bilanse energetyczne. Testy te prowadzone są na stanowisku laboratoryjnym.

Stanowisko laboratoryjne wyposażone w system monitoringu parametrów mechanicznych i elektrycznych pozwala w każdej chwili trwania cyklu pracy układu dokładne wyznaczenie bilansu energetycznego i kierunków przepływu mocy.

Parametry elektryczne (prądy i napięcia faz silnika elektrycznego oraz baterii) mierzone są przy pomocy przetworników napięciowo-napięciowych i prądowo-napięciowych (firmy LEM) wykorzystujących efekt Halla, dzięki czemu unika się konieczności galwanicznego podłączania czujników do obwodów elektrycznych układu, jednocześnie uzyskując:

-dla przetworników prądowo-napięciowych:

szerokie pasmo przenoszonych częstotliwości sygnałów (0-500 kHz),

dużą dokładność ($\pm 0,1\%$ przy 25°C),

krótki czas odpowiedzi ($0,4 \mu\text{s}$)

dobrą liniowość ($\pm 0,05\%$).

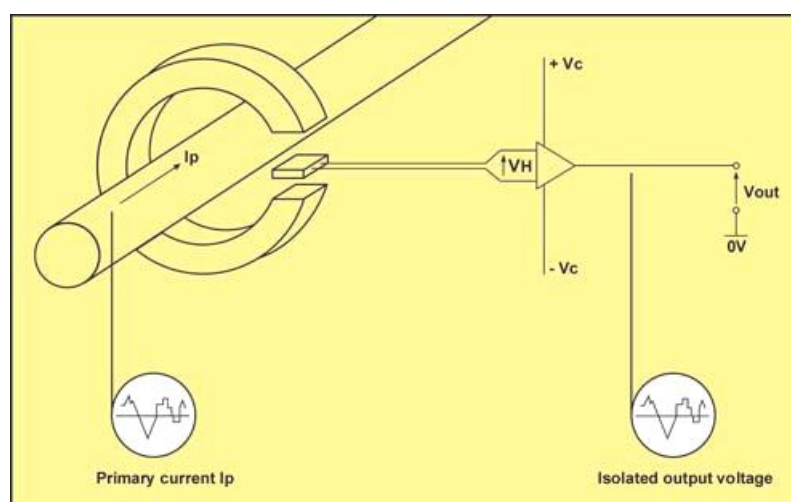
-dla przetworników napięciowo-napięciowych:

szerokie pasmo przenoszonych częstotliwości sygnałów (kilkadziesiąt kHz),

dużą dokładność ($\pm 1,0\%$ przy 25°C),

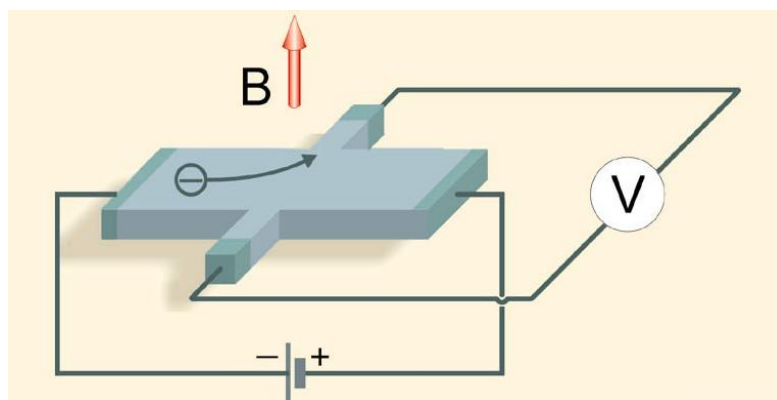
krótki czas odpowiedzi ($10 \mu\text{s}$)

dobrą liniowość ($\pm 1\%$).



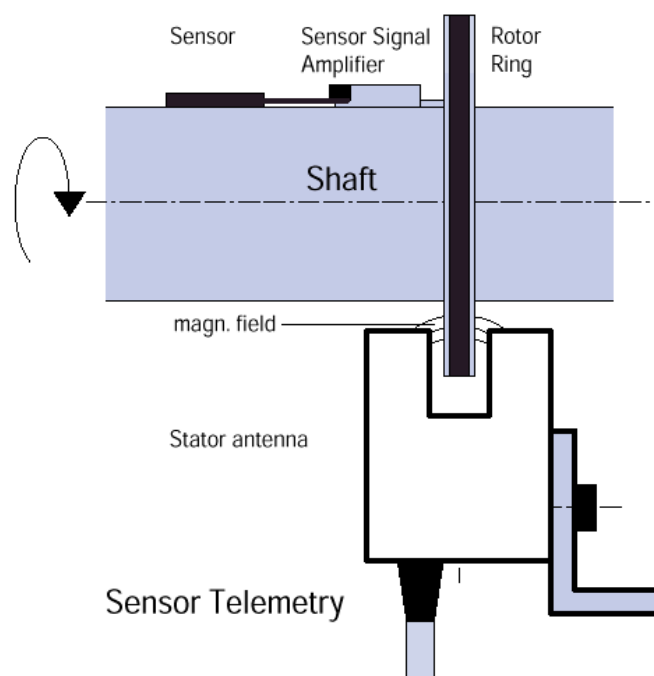
Rys.5-2. Koncepcja wykorzystania efektu Halla do pomiaru prądu

Pomiar prądu metodą Halla polega na rejestrowaniu przebiegu napięciowego odwzorowującego przebieg mierzonego prądu. Prąd mierzony (pierwotny) wywołuje powstawanie wokół przewodu strumienia magnetycznego (rys.5-2). Strumień ten zamyka się w pierścieniowym magnetowodzie, którego jednym z elementów jest płytka, na której zachodzi efekt Halla (tzw. hallotron). Płytką podłączona jest do źródła napięcia, zatem elektron poruszający się w polu magnetycznym podlega działaniu siły, która odchyła go w kierunku prostopadłym zarówno do kierunku ruchu, jak i do kierunku pola magnetycznego. Wynikiem tego jest gromadzenie się nadmiarowego ładunku elektrycznego na jednej ze ścianek przewodnika, co powoduje wytworzenie poprzecznego napięcia Halla (proporcjonalnego do mierzonego prądu) (rys.5-3).



Rys. 5-3. Efekt Halla

Parametry mechaniczne (momenty i prędkości obrotowe na trzech wałach przekładni planetarnej) mierzone są przy pomocy systemu telemetrycznego firmy ESA Messtechnik GmbH.



Rys. 5-4. System telemetryczny

Zasada pomiaru momentu skręcającego polega na tym, że moment skręcający powoduje odkształcenie tensometrów naklejonych na obracającym się wale, co z kolei powoduje zmianę rezystancji tensometrów i wartości przepływającego przez nie prądu. Prąd ten, po wzmocnieniu, przepływa przez metalowy pierścień zatopiony w tarczy z tworzywa umocowanej na wale. Wartość prądu jest mierzona telemetrycznie (bezstykowo przy wykorzystaniu pola magnetycznego i zjawiska indukcji magnetycznej) przez nieruchomy czujnik znajdujący się w pobliżu tarczy.

Parametry układu telemetrycznego:

Częstotliwość nośna 100 kHz,

Liniowość < 0,05 %

Wzmocnienie od 100 do 100000

Wszystkie mierzone wielkości elektryczne i mechaniczne, po przetworzeniu na sygnał napięciowy +/-10V, są rejestrowane przez system akwizycji danych pomiarowych,

pozwalający na jednoczesne monitorowanie 16 sygnałów pomiarowych z częstotliwością do 300 000 próbek na sekundę (na 1 kanał).



Rys. 5-5. Elementy systemu akwizycji danych pomiarowych

Tak wysoka częstotliwość próbkowania pozwala na rejestrację nawet szybkozmiennych wielkości takich jak prąd i napięcie fazowe na uzwojeniach wysokoobrotowego silnika synchronicznego z magnesami trwałymi (7500 obr/min) wykorzystanego w prezentowanym stanowisku.

Zastosowane na stanowisku laboratoryjnym w/w rozwiązań pozwala na uzyskanie sygnałów pomiarowych w pełnym zakresie występujących podczas pracy częstotliwości, z poziomem szumów i zakłóceń znacznie niższym, niż w przypadku tradycyjnych metod transmisji sygnałów (np. poprzez pierścienie i szczotki). Dzięki szybkiemu i precyzyjnemu monitoringowi można w każdej chwili dokładnie określić rzeczywisty stan dynamiczny układu. Na tej podstawie i z wykorzystaniem odpowiedniego układu sterowania (obecnie stanowisko nie jest wyposażone w układ automatycznego sterowania) możliwe jest określenie najbardziej właściwej dla realizowanego cyklu funkcji sterowania (według przyjętych założeń i kryteriów).

6. Przykładowe testy laboratoryjne rejestracji stanów dynamicznych napędu

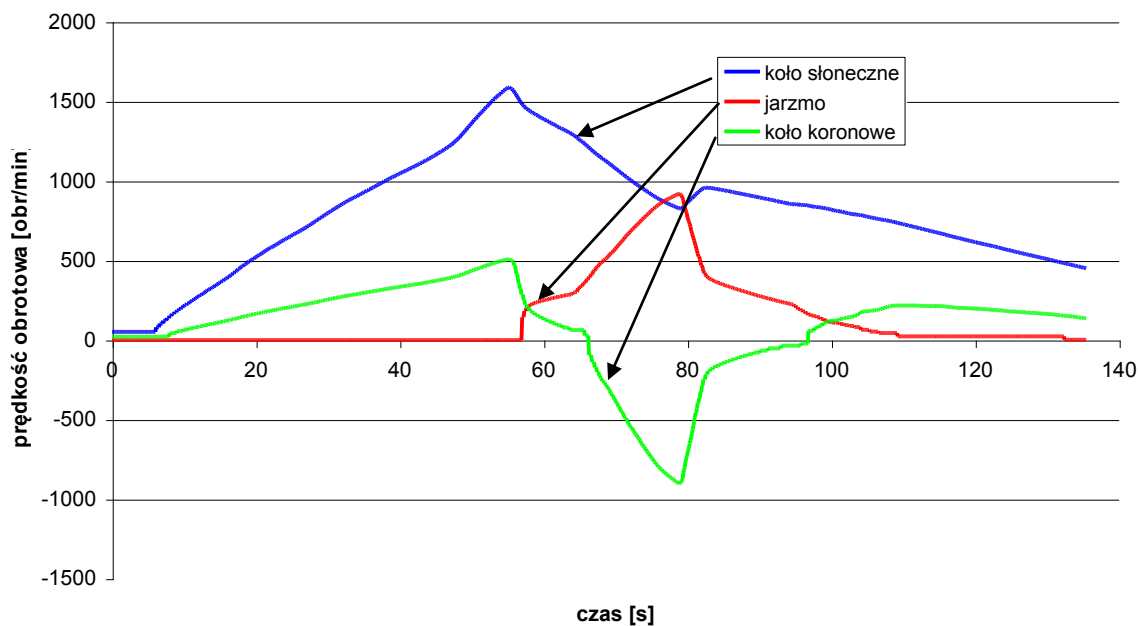
A) napęd dwuzródłowy

Na stanowisku laboratoryjnym wykonano badania mające na celu sprawdzenie prawidłowości funkcjonowania systemu monitorowania i akwizycji danych.

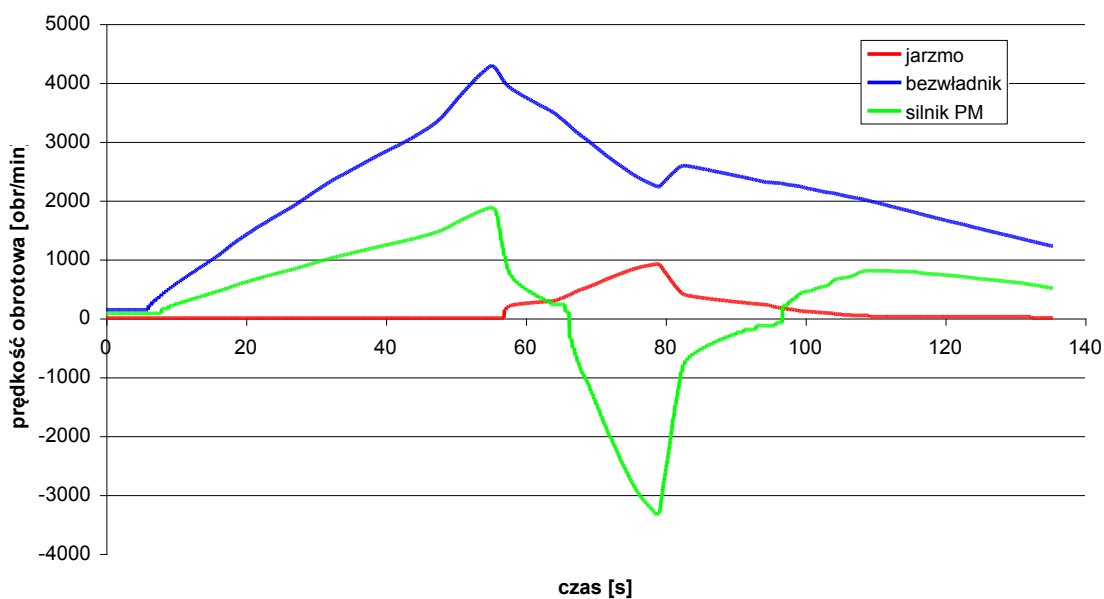
Zrealizowano cykl składający się z następujących faz:

- 1- ładowanie (rozpędzanie) bezwładnika kompozytowego przy zablokowanym jarzmie
- 2- hamowanie silnika synchronicznego PM (przygotowanie do zmiany kierunku obrotów)
- 3- rozpędzanie masy odwzorowującej inercję pojazdu (zmieniony kierunek obrotów silnika PM)
- 4- hamowanie i odzysk energii (jednoczesne ładowanie akumulatorów elektrochemicznych i bezwładnika poprzez zwiększenie jego prędkości obrotowej)

Otrzymano następujące wyniki:

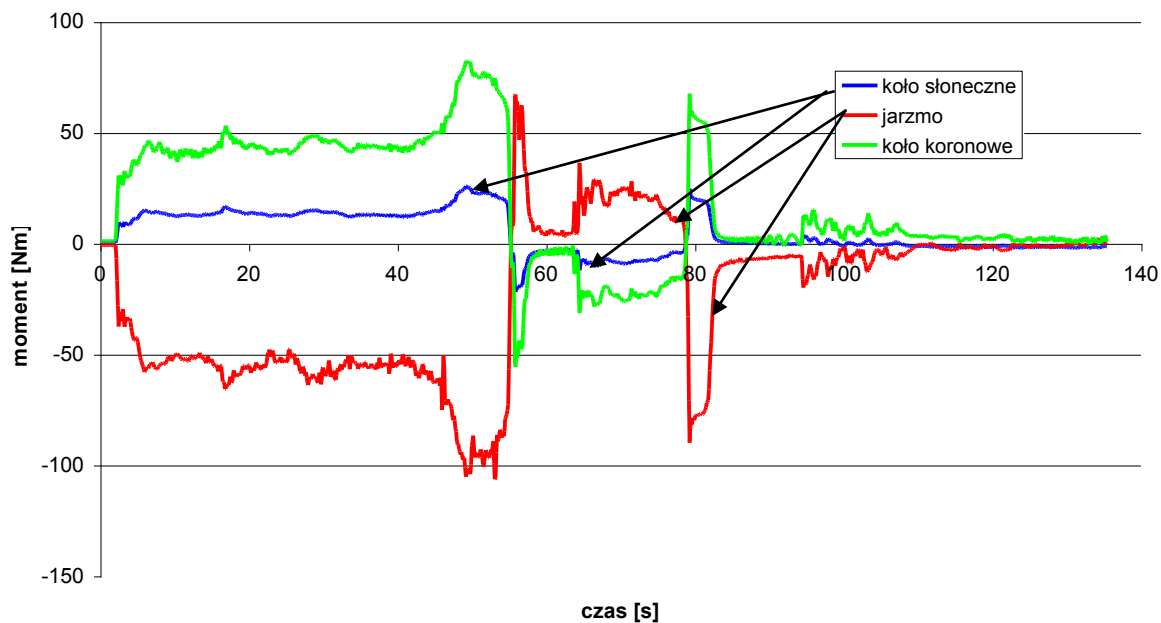


Rys. 6-1a. Przebiegi prędkości obrotowych wałów przekładni planetarnej



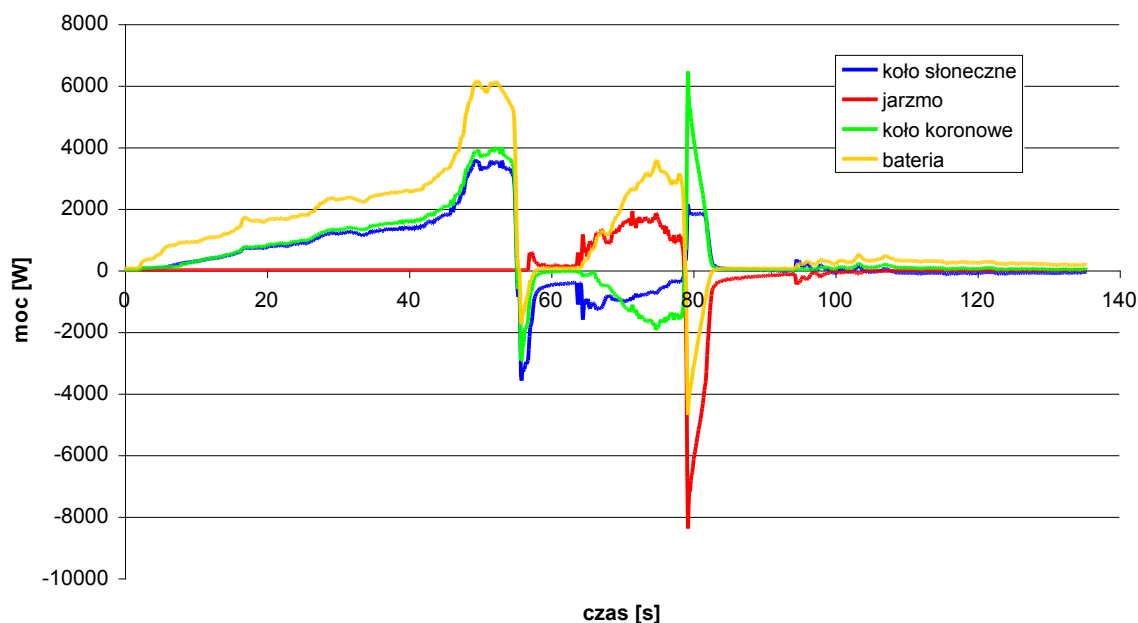
Rys. 6-1b. Przebiegi prędkości obrotowych wałów elementów układu napędowego

Rysunki 6-1a i 6-1b przedstawiają odpowiednio: przebiegi prędkości obrotowych wałów przekładni planetarnej oraz przebiegi prędkości obrotowych wałów elementów układu napędowego (z uwzględnieniem przełożeń pośrednich). Szczególną uwagę należy zwrócić na spadek prędkości obrotowej bezwładnika podczas rozpędzania jarzma – następuje wówczas przekazanie zsumowanej mocy z bezwładnika i silnika PM na jarzmo. Natomiast podczas hamowania, następuje przyrost prędkości obrotowej bezwładnika, czyli jego doładowanie mocą pochodzącą z hamowanego jarzma.



Rys. 6-2. Przebiegi momentów skręcających na wałach przekładni planetarnej

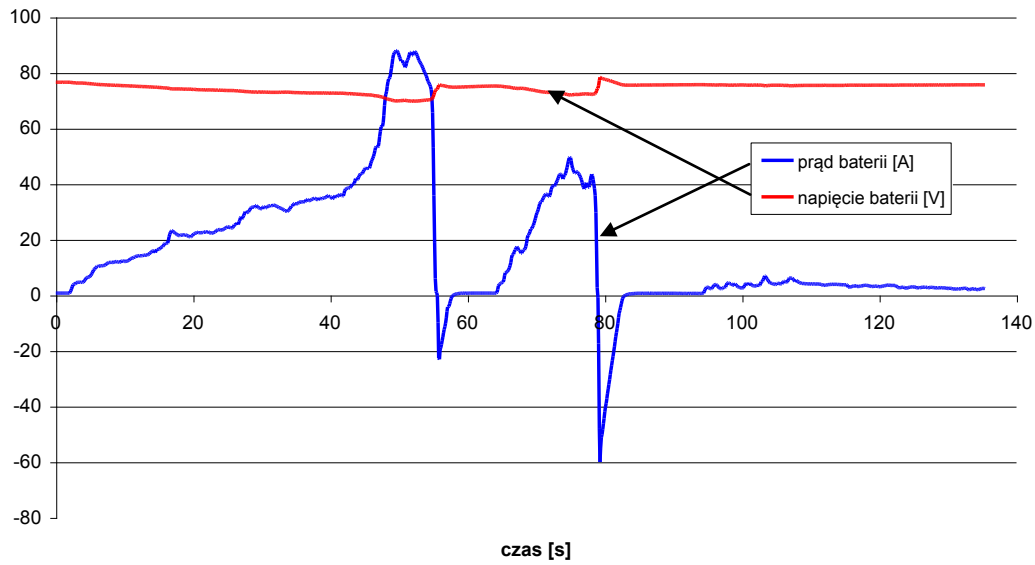
Na rys. 6-2 zamieszczono przebiegi ziemnych momentów skręcających obciążających poszczególne wałki przekładni planetarnej.



Rys. 6-3. Przebiegi mocy poszczególnych elementów układu napędowego

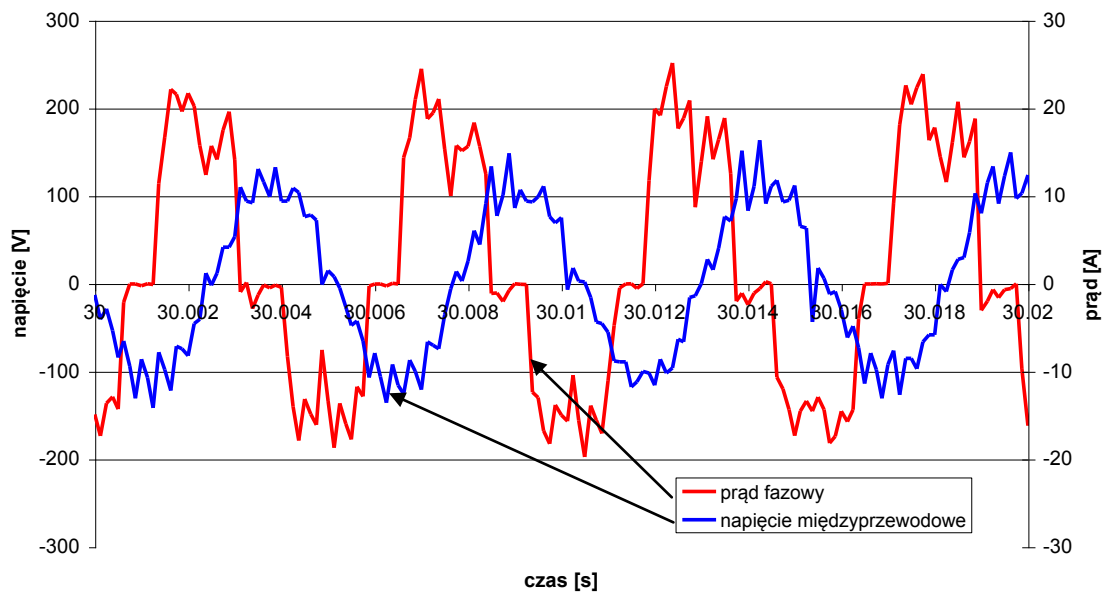
W pierwszej fazie cyklu ładowany jest bezwładnik, cała energia jest wykorzystana do podwyższenia jego prędkości obrotowej (rys. 6-3). W następnej fazie następuje hamowanie silnika synchronicznego PM (przygotowanie do zmiany kierunku obrotów). Następuje wtedy zwrot części energii do baterii. W kolejnej fazie cyklu realizowane jest rozpędzanie masy wirującej umieszczonej na wale jarzma. Wykorzystana jest do tego moc pochodząca z baterii i hamowanego bezwładnika. W ostatniej fazie następuje zahamowanie wału jarzma związane

z odzyskiem energii do baterii elektrochemicznej i bezwładnika (podwyższenie jego prędkości obrotowej).

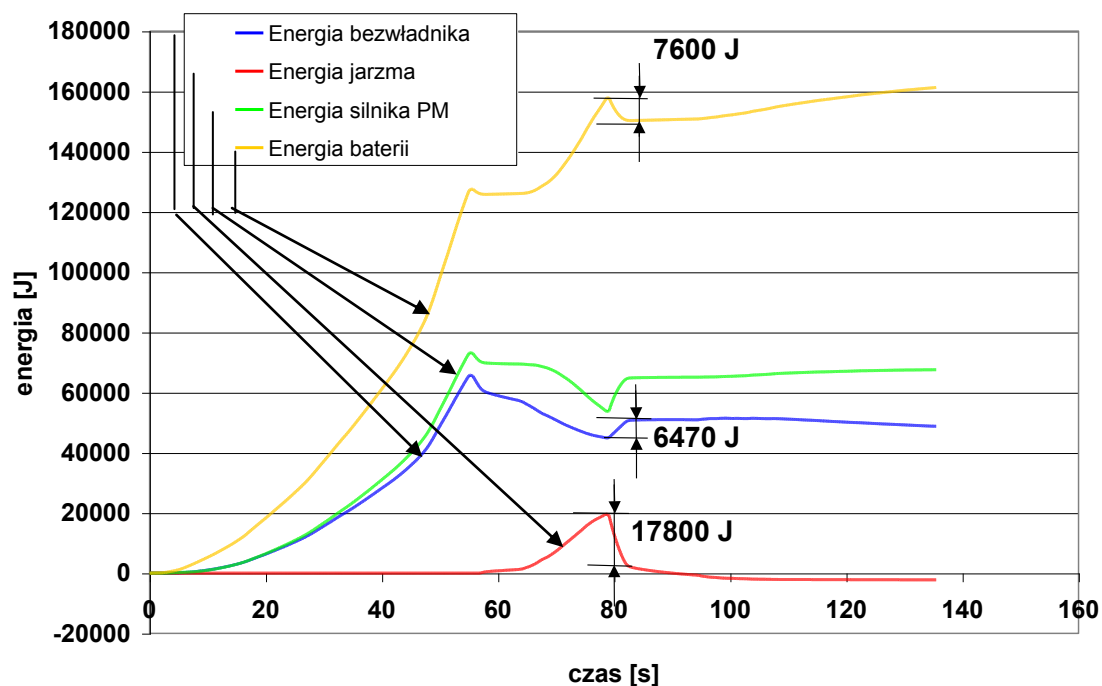


Rys. 6-4a. Przebiegi prądu i napięcia na zaciskach baterii

Ujemne wartości prądu połączone z jednoczesnym podwyższeniem napięcia na zaciskach baterii świadczą o ładowaniu baterii w fazach hamowania rekuperacyjnego.



Rys. 6-4b. Przykładowy przebieg prądu fazowego i napięcia międzyprzewodowego na fazach silnika synchronicznego PM (wycinek czasowy 0.02 s.)



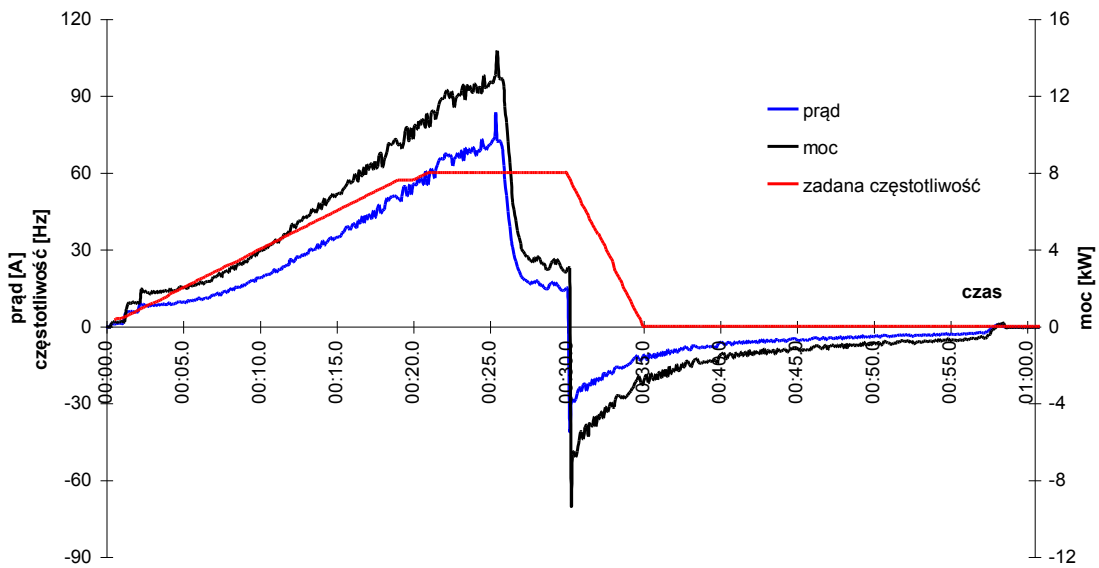
Rys. 6-5. Przebiegi energii wydatkowanej z baterii elektrochemicznej oraz akumulowanej w bezwładniku

Na rysunku 6-5 przedstawione zostały przebiegi energii poszczególnych elementów układu. Szczególnie interesujący jest kształt przebiegów w momencie hamowania odzyskowego – energia na wale jarzma w ilości 17800 J, podczas hamowania, została w znacznym stopniu odzyskana i przekazana do baterii elektrochemicznej (7600 J) oraz do bezwładnika (6470 J). Oznacza to, że w sumie odzyskano 14070 J, czyli ok. 79% energii możliwej do odzyskania. Pamiętać należy jednak, że wyliczenia te dotyczą jedynie fazy hamowania efektywnego, tzn. takiego, w którym silnik elektryczny pracuje jako generator – poniżej pewnych prędkości silnik traci możliwość generowania momentu hamującego i układ hamuje jedynie dzięki oporom ruchu. W takich warunkach odzysk jest niemożliwy, a energia tracona na opory ruchu stanowi straty – w zaprezentowanym cyklu jest 2200 J.

B) Napęd szeregowy

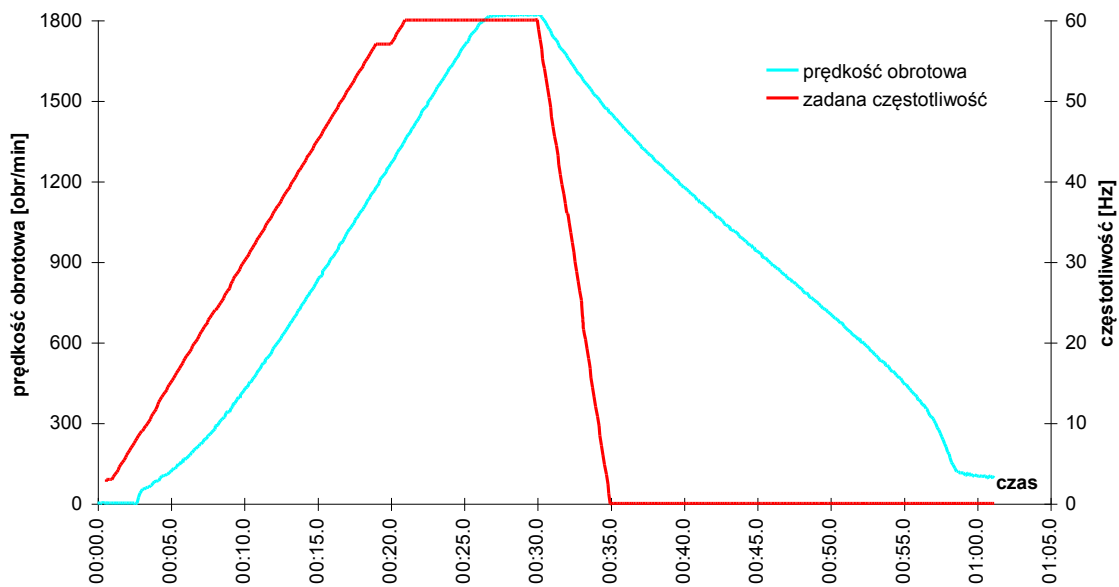
Przykładowe badania stanowiskowe zamieszczone w mniejszej instrukcji, dla szeregowej struktury napędowej polegały na rozpędzaniu masy wirującej do prędkości 150, 180, 210 rad/s, a następnie po kilku sekundowej (ok. 10-20 s) fazie ruchu ze stałą prędkością wprowadzenie układu w fazę hamowania odzyskowego przez odpowiednio szybkie zmniejszanie częstotliwości napięcia zasilającego silnik AC, zachowując stałymi przedziałami stosunek U/f . W trakcie realizacji takiego cyklu pracy obserwowano na monitorze komputera PC przebiegi wielkości elektrycznych (prąd, napięcie oraz mocy elekt. baterii) oraz mechanicznych (prędkości kątowe i moment obrotowy).

Na rys. 6-6 przedstawiono przebiegi wielkości elektrycznych: prądu i mocy na zaciskach baterii dla zmian częstotliwości napięcia do 60 Hz. Zmiana kierunku prądu i mocy na baterii w fazie hamowania wskazuje na rozpoczęcie się procesu zwrotu energii do baterii (ładowanie baterii).



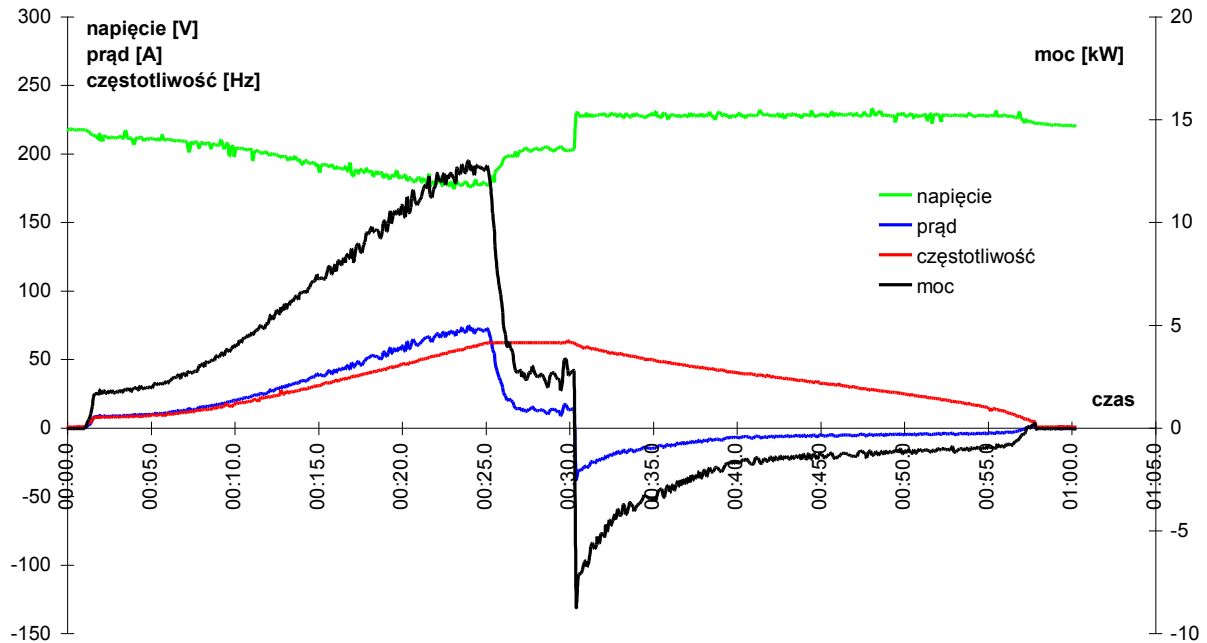
Rys.6-6. Przebiegi prądu i mocy elektrycznej baterii napędu szeregowego

Rys 6-7 przedstawiono przebiegi wielkości mechanicznych. Przebieg prędkości obrotowej masy wirującej w fazie hamowania wpływa na charakter zmian prądu baterii mimo zanikającej częstotliwości napięcia zasilającego silnik AC.

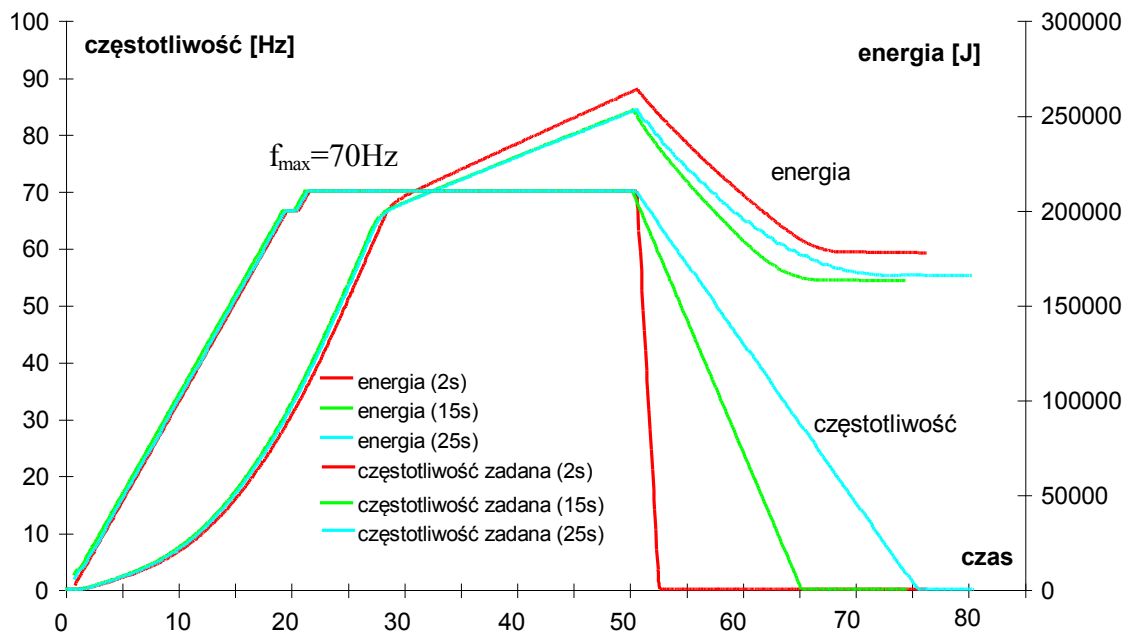


Rys. 6-7. Przebiegi prędkości obrotowej napędu szeregowego

Na rys. 6-8 przedstawiono przebiegi wielkości elektrycznych i mechanicznych dla automatycznego rozpoczęcia fazy hamowania (za pomocą przycisku zatrzymania na szafie sterowniczej falownika).



Rys. 6-8. Przebiegi wielkości elektrycznych napędu szeregowego



Rys. 6-9. Przykładowe przebiegi energii wydatkowanej przez baterię dla cykli pracy napędu $f_{\max}=70\text{Hz}$

Najbardziej interesująca z punktu widzenia rekuperacji energii faza hamowania odzyskowego była przeprowadzona dla 3-ch czasów (2, 15, 25 s) zmiany częstotliwości napięcia zasilającego silnik AC od wartości maksymalnej do 0. Zbiorcze zestawienie przebiegów energii wydatkowanej z baterii elektrochemicznej pokazano na rys. 6-9 dla nominalnej częstotliwości 70 Hz. Analiza otrzymanych przebiegów wskazuje, iż możliwie największa ilość energii zwracanej do baterii w fazie hamowania odzyskowego (ok. 85 kJ) następuje dla maksymalnie długiej fazy hamowania 25s i wysokiej częstotliwości maksymalnej 70 Hz napięcia zasilającego silnik AC. Obliczona dla tego przypadku sprawność odzyskowa (liczona od baterii od baterii) wynosi 34,5% (uwzględniając straty energii ok. 10% w fazie ruchu ustalonego). Dalsze wydłużanie fazy hamowania powoduje, że napęd zostaje wprowadzony w zakres pracy niestabilnej. Następuje wówczas samoistne przełączenie pracy falownika z zakresu pracy odzyskowej zakres pracy napędowej.

Tak wysoka sprawność odzyskowa wynika z faktu, że w tym przypadku napęd nie był obciążony momentem stałym, straty mechaniczne mocy wynikają jedynie z tarcia ruchu w łożyskach napędu.

5. Przebieg ćwiczenia

I. Procedury uruchomienia stanowisk laboratoryjnych.

A) napęd dwuzródłowy

1. Procedura uruchomienia stanowiska:
 - a) włączenie zasilania 220V na ściennej tablicy rozdzielczej,
 - b) włączenie zasilania przetworników cyfrowych (włącznik 1)
 - c) włączenie stycznika głównego - zasilanie wentylatora oraz silnika PM (włącznik 2)
 - d) na płycie sterującej kontrolera silnika PM należy ustawić włącznik:
 - 1 - w poz. LOGIC ON
 - 2 - w poz. ENABLE
 - 3 - w poz. FWD/REV dokonując wyboru kierunku prędkości obrotowej silnika PM
 - 4 - za pomocą potencjometrów A i B sterować zmianą jego prędkości obrotowej silnika PM

B) napęd szeregowy

1. Procedura uruchomienia stanowiska laboratoryjnego:
 - a) włączenie zasilania na ściennej tablicy rozdzielczej,
 - b) na szafie sterującej należy kolejno:
 - włączyć zasilanie szafy – pomarańczowy wyłącznik
 - włączyć zasilania silnika PM - nacisnąć przycisk zielony,
 - c) dokonać ręcznego rozruchu silnika PM - kręcąc kołem zamachowym przeciwnie do wskazówek zegara (stojąc tyłem do drzwi wejściowych),
 - d) za pomocą szeregowego hamulca obciążyć układ napędowy odpowiednim momentem,
 - e) opcjonalnie można przeprowadzić hamowanie odzyskowe – uruchamiając przycisk niebieski na szafie sterowniczej.

Na cyfrowych wyświetlaczach pokazują się kolejno wielkości:

- prąd akumulatorów [A],
 - napięcie akumulatorów [V],
 - moment obciążenia [Nm],
 - prędkość obrotowa zespołu napędowego [obr/min].
2. Procedura zatrzymania i odłączenie od sieci zasilającej stanowiska laboratoryjnego
- a) na szafie sterującej należy kolejno:
 - wyłączyć zasilanie silnika PM - nacisnąć przycisk czerwony,
 - wyłączyć zasilanie szafy – pomarańczowy wyłącznik.
 - b) wyłączyć zasilanie na ściennej tablicy rozdzielczej.

Uwaga:

Uruchomienie stanowiska dokonuje wyłącznie upoważniona osoba.

II. Rejestracja danych pomiarowych i opracowanie wyników

Przebieg ćwiczenia polega na:

- a) zrealizowaniu na stanowisku przykładowego cyklu jazdy tj.
 - rozpedzenie (ładowanie) akumulatora inercyjnego (bezwładnika),
 - rozpedzenia masy odwzorowującej masę pojazdu, wykorzystując jednocześnie energię pochodzącą z dwóch źródeł: z akumulatorów elektrochemicznych i z wirującego bezwładnika (tylko dla napędu dwuzródłowego),
 - hamowania odzyskowego, w którym energia kinetyczna masy odwzorowującej masę pojazdu odzyskiwana jest do akumulatora elektrochemicznego i bezwładnika (tylko dla napędu dwuzródłowego),
- b) dokonanie rejestracji, przy pomocy systemu akwizycji danych pomiarowych, (podczas trwania cyklu) wybranych wielkości mechanicznych i elektrycznych tj: momentów, prędkości obrotowych, prądów i napięć,
- c) opracowaniu wyników:
 - wyznaczenie przebiegów mocy elektrycznej i mechanicznej oraz energii dostarczonej do układu,
 - określenie wstępnego bilansu energii analizowanego napędu dla założonego cyklu pracy.

Uwaga: Potrzebne do wykonania ćwiczenia pliki znajdują się na stronie internetowej Instytutu MRC w zakładce: Dydaktyka > Przedmioty obowiązkowe > Napędy elektryczne > E1 > <dane> .

Opracował: dr inż. Andrzej Rostkowski
dr inż. Piotr Piórkowski