

mgr inż. Piotr Piórkowski
Instytut Maszyn Roboczych Ciężkich
Politechniki Warszawskiej,

dr inż. Andrzej Kobosko
Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów

SYSTEMY MONITOROWANIA PROCESÓW SZYBKOZMIENNYCH

W artykule przedstawiono wyniki badań procesów dynamicznych występujących w napędach elektrycznych i napędach hybrydowych (elektryczno-spalinowych). Badania prowadzono monitorując wiele parametrów takich jak prędkość obrotową, momenty, prąd, napięcie i moc elektryczną itp. Wykorzystywano telemetryczny system komputerowego monitorowania metodą „on line”. Następnie przetworzenie danych prowadzono w systemie „off line”. Ze względu na niebezpieczną atmosferę pracy przedstawiono również nowe wymagania dotyczące pracy systemów monitorowania w atmosferze zagrożonej wybuchem. Szczególnie dotyczą one czujników w wykonaniu iskrobezpiecznym pracujących w najcięższych warunkach. Muszą one spełniać funkcje podstawowe-metrologiczne, ale swoim działaniem nie powinny przyczynić się do powstania eksplozji. Przedstawiono również unikatowy system monitorowania wykorzystywany w pracach badawczych oraz w dydaktyce studenckiej.

MONITORING SYSTEM FOR SHORT RESPONSE TIME

The paper presents the computerising multichannel system for monitoring and testing the dynamic processes in electrical and hybrid drives. The system operates „on line” in very short response time on telemetric base. It provides the continuous measurements of the following parameters: rotary speed, torques and electrical currents and tensions. The measurement data is stored in the computer so it allows for further „off line” analysis and conversion. The second part of this paper presents the influence of explosive atmosphere on monitoring sensors design at intrinsic safety technique. The design procedure of a monitoring system has also been shown.

1. WPROWADZENIE

Do badań procesów dynamicznych występujących w napędach elektrycznych i napędach hybrydowych (spalinowo-elektrycznych) zastosowano system ESAM/PP/SP [5]. Badania te miały na celu monitorowanie wielu parametrów szybkozmiennych takich jak prędkość obrotową, momenty napędowe, przyspieszenia, parametry elektryczne: prąd, napięcie i moc. Kontrola ich ma na celu określenia rzeczywistych wartości w różnych fazach rozruchu, prędkości zadanej i hamowania napędów. Wyniki tych badań są pomocne w pracach badawczych związanych z projektowaniem nowych napędów, które wykonywane były w ramach Projektu Badawczego finansowanego z puli Komitetu Badań Naukowych oraz w

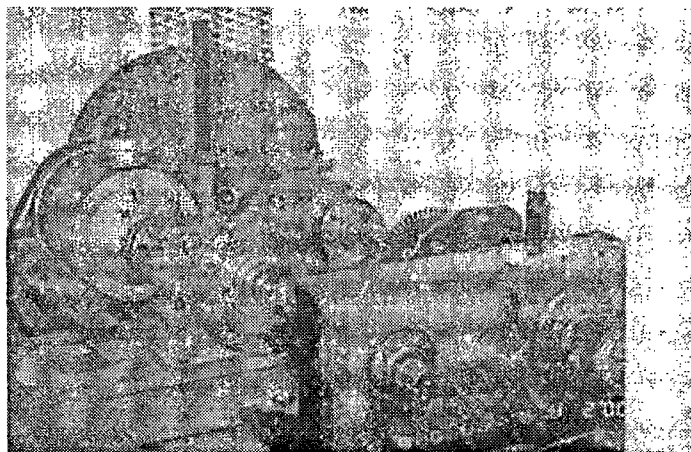
ramach prac własnych Politechniki Warszawskiej. Stanowisko z tym systemem monitorowania procesów szybkozmiennych wykorzystywane było do zadań dydaktycznych w Zespole Napędów Instytutu Maszyn Roboczych Ciężkich Politechniki Warszawskiej. Ponieważ niektóre czujniki systemu monitorowania pracują w atmosferze wybuchowej dlatego wykorzystano, w budowie systemu, doświadczenia Przemysłowego Instytutu Automatyki i Pomiarów w zakresie systemów przeznaczonych do pracy w takim otoczeniu.

2. TELEMETRYCZNE SYSTEMY MONITOROWANIA

Napędy pojazdów hybrydowych (wielozródłowych) 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.

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

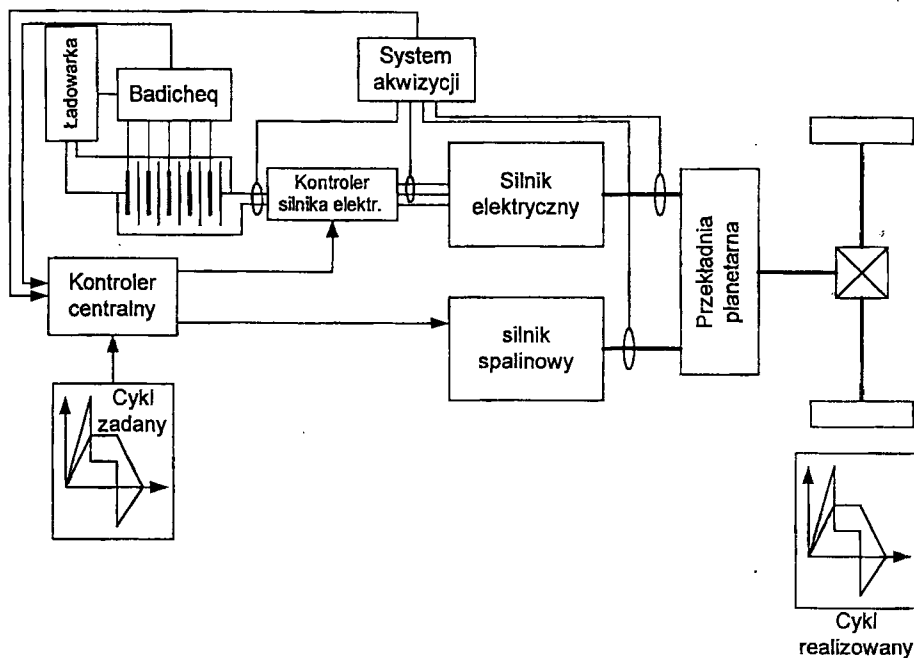
Znajomość funkcji stanu całego układu oraz wymuszeń pozwala określić odpowiednią funkcję sterowania realizującą określony cel np. minimalizację zużycia paliwa przy założeniu, że poziom naładowania baterii po zakończeniu jazdy będzie taki sam jak przy rozpoczęciu cyklu jazdy. Poniżej zaprezentowany jest schemat ideowy hybrydowego układu napędowego pojazdu z uwzględnieniem systemu monitorowania rejestrującego parametry mechaniczne (momenty i prędkości obrotowe poszczególnych wałów przekładni planetarnej) i elektryczne (napięcia i prądy w poszczególnych fazach silnika synchronicznego Permanent Magnet, napięcie i prąd baterii akumulatorów oraz poziom naładowania baterii), rys. 1.



Fot.1 Stanowisko do badań wielozródłowego układu napędowego z bezwładnikiem kompozytowym, silnikiem synchronicznym z magnesami trwałymi i z przekładnią planetarną [1-3]

W celu określenia najważniejszych funkcji sterowania pracą silników wielozródłowego 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 badawcze oprócz wyznaczenia funkcji sterowań służyć ma celom dydaktycznym, fot. 1.

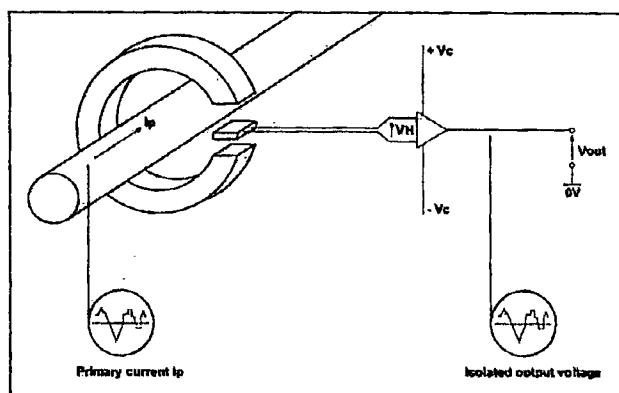


Rys. 1. Schemat ideowy hybrydowego układu napędowego pojazdu z uwzględnieniem systemu monitorowania. Badicheq oznacza system monitorowania baterii. [1-3]

Stanowisko laboratoryjne oprócz elementów układu napędowego (przekładnia planetarna, silnik elektryczny, bezwładnik kompozytowy, reduktory, bateria żelowych akumulatorów trakcyjnych itd.) wyposażone jest w system monitorowania parametrów mechanicznych i elektrycznych. W każdej chwili trwania cyklu pracy układu możliwe jest dokładne wyznaczenie bilansu energetycznego i kierunków przepływu mocy. Parametry elektryczne (prądy i napięcia w poszczególnych fazach silnika elektrycznego oraz baterii) mierzone są przy pomocy przetworników napięciowo-napięciowych i prądowo-napięciowych wykorzystujących efekt Hall'a (firmy LEM), dzięki czemu unika się konieczności galwanicznego podłączania czujników do obwodów elektrycznych układu, jednocześnie uzyskując:

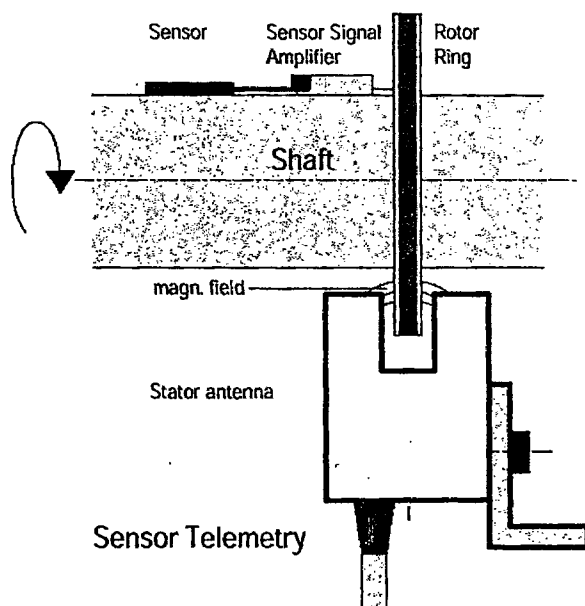
1. dla przetworników prądowo-napięciowych:
 - szerokie pasmo przenoszonych częstotliwości sygnałów (0-500 kHz),
 - dużą dokładność ($\pm 0,1\%$ przy 25°C),
 - krótki czas odpowiedzi (0,4 μs)
 - dobrą liniowość ($\pm 0,05\%$).
2. dla przetworników napięciowo-napięciowych:
 - szerokie pasmo przenoszonych częstotliwości sygnałów (kilkadziesiąt kHz),
 - dużą dokładność ($\pm 1,0\%$ przy 25°C),
 - krótki czas odpowiedzi (10 μs)

- dobrą liniowość ($\pm 1\%$).



Fot.2. Koncepcja wykorzystania efektu Hall'a do pomiaru prądu bez galwanicznego połączenia obwodu prądowego z obwodem miernika [4]

Parametry mechaniczne (momenty i prędkości obrotowe na trzech wałach przekładni planetarnej) mierzone są przy pomocy systemu telemetrycznego. Opisy na rysunku podawane są w wersji oryginalnej angielskiej.



Rys. 2. Zasada pracy czujnika telemetrycznego

Moment mechaniczny 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 (przy wykorzystaniu pola magnetycznego i zjawiska indukcji magnetycznej) przez nieruchomy czujnik znajdujący się w pobliżu tarczy.

3. 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 $\pm 10V$, są rejestrowane przez system akwizycji danych pomiarowych, pozwalający na jednoczesne monitorowanie 16 sygnałów pomiarowych z częstotliwością do 300 000 próbek na sekundę.

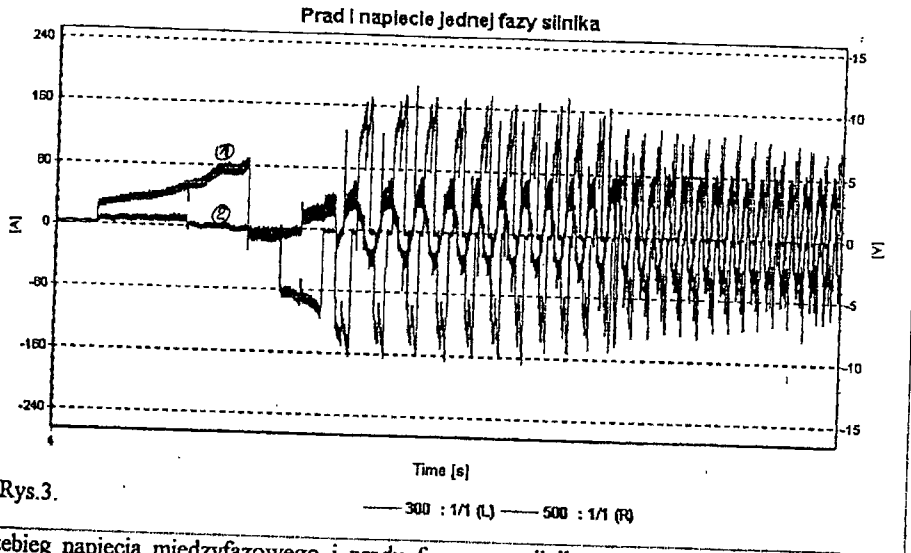


Fot.3. System akwizycji danych pomiarowych

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 ww. rozwiązania 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 monitorowaniu można w każdej chwili dokładnie określić rzeczywisty stan dynamiczny układu, aby na tej podstawie określić właściwą funkcję sterowania (według przyjętych założeń i kryteriów).

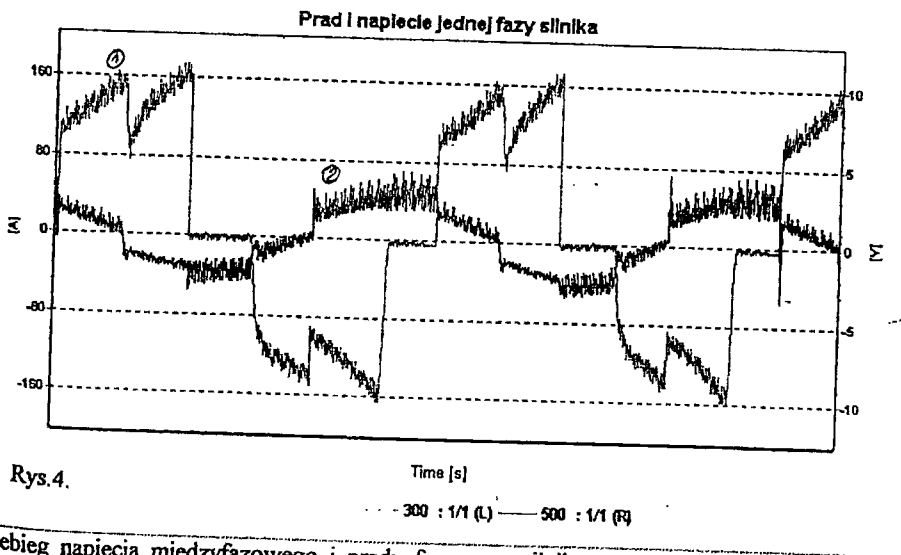
3. WYNIKI WAŻNIEJSZYCH POMIARÓW

Wyniki przedstawione są na rysunkach 3-8. Przebiegi napięciowe i prądowe przedstawione są podczas stanu pracy ustalonej, rozruchu i wybiegu silnika synchronicznego z magnesami trwałymi PM. Na rys.7-8 podano przykładowy przebieg momentów skracających na trzech wałach przekładni planetarnej podczas przyspieszenia i hamowania.



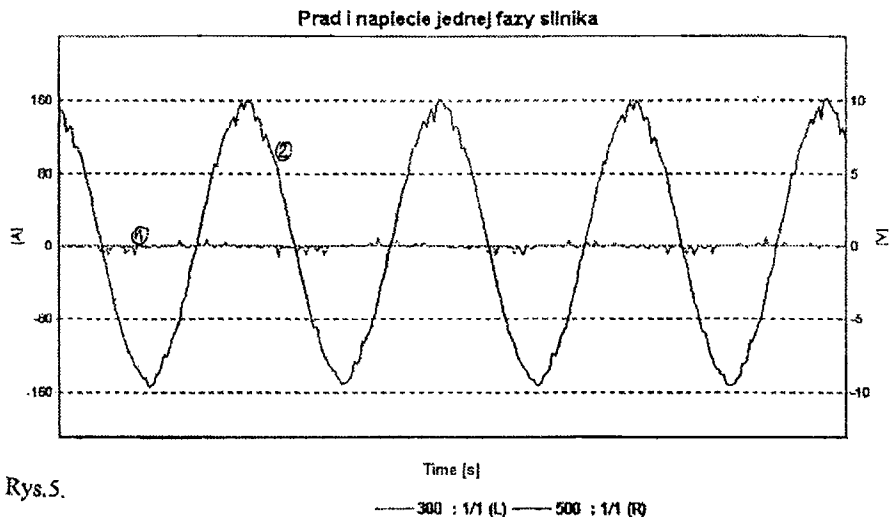
Rys.3.

Przebieg napięcia międzyfazowego i prądu fazowego silnika synchronicznego z magnesami trwałymi PM podczas rozruchu (odcinek czasowy – 1 sek.). Kolor zielony oznacza prąd(1), niebieski – napięcie(2)



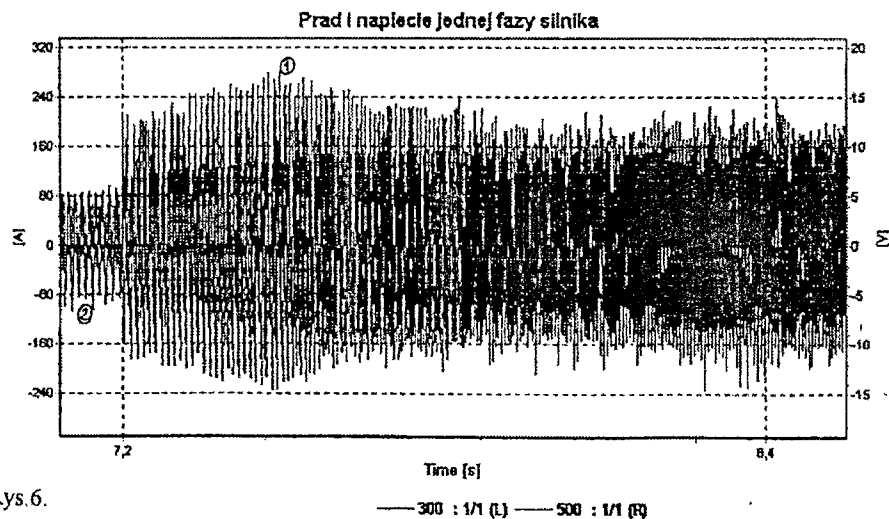
Rys.4.

Przebieg napięcia międzyfazowego i prądu fazowego silnika synchronicznego z magnesami trwałymi PM podczas pracy ustalonej (odcinek czasowy – 0,01 sek.). Kolor zielony oznacza prąd, niebieski – napięcie(2)



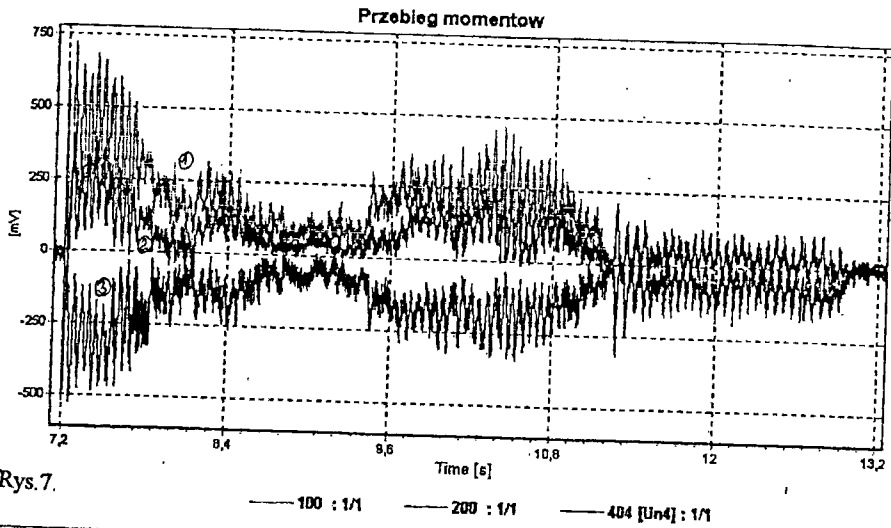
Rys.5.

Przebieg napięcia międzyfazowego i prądu fazowego silnika synchronicznego z magnesami trwałymi PM podczas wybiegu (odcinek czasowy – 0,05 sek.). Kolor zielony oznacza prąd(1), niebieski – napięcie(2)



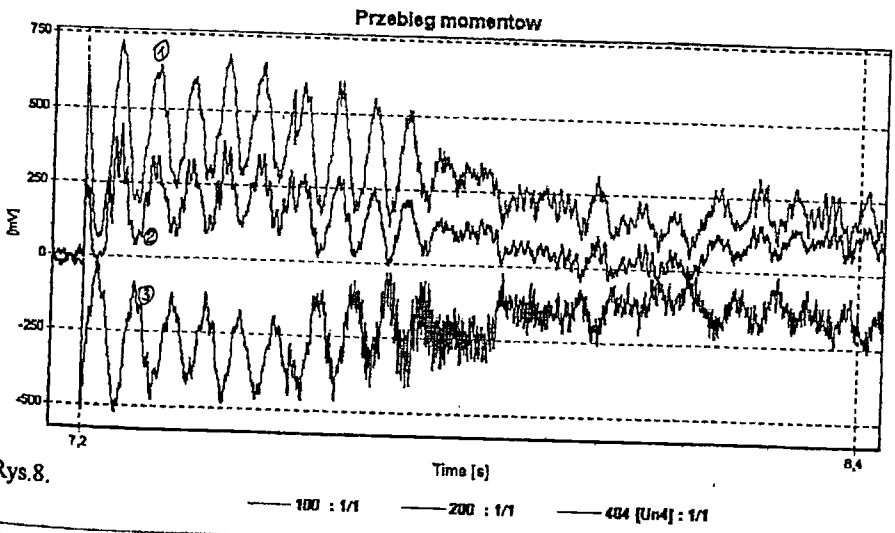
Rys.6.

Przebieg napięcia międzyfazowego i prądu fazowego silnika synchronicznego z magnesami trwałymi PM (odcinek czasowy – ok. 1,4 sek.). Kolor zielony oznacza prąd(1), niebieski – napięcie(2)



Rys. 7.

Przykładowy przebieg momentów skręcających na trzech wałach przekładni planetarnej podczas przyspieszania i hamowania (podczas hamowania zmienia się znak momentów). Sygnał mierzony jest w mV – należy go następnie przeliczyć korzystając z odpowiednich charakterystyk.



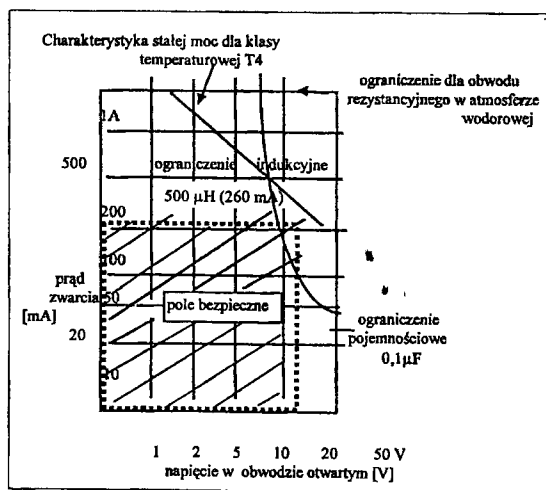
Rys. 8.

Ten sam przebieg w krótszym odcinku czasowym –widać, że oscylacje przebiegów wywołane są drganiami mechanicznymi a nie zakłóceniami.

4. MONITOROWANIE PRZEBIEGÓW TERMICZNYCH W ATMOSFERZE ZAGROŻONEJ WYBUCHEM

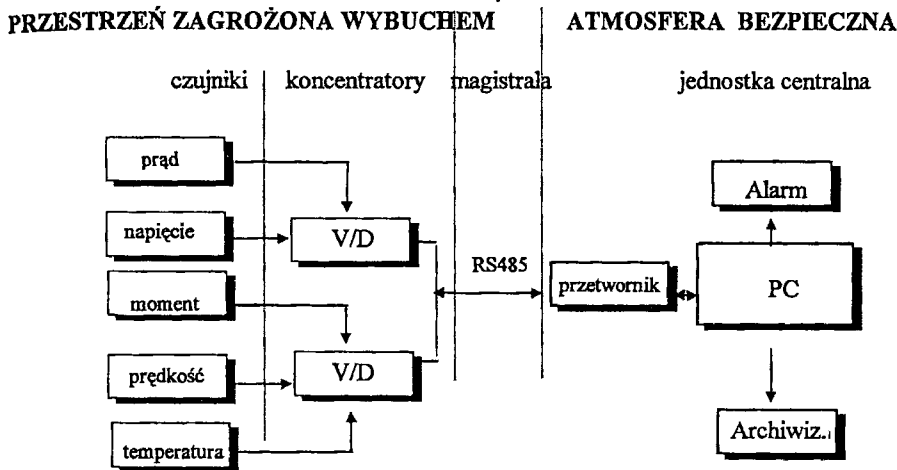
W monitorowaniu przebiegów występujących w napędach hybrydowych ważne znaczenie ma kontrola temperatury w obszarach szczególnie obciążonych. Do nich zalicza się głowice silników spalinowych, łożyska, miski olejowe a także uzwojenia czołowe w silnikach elektrycznych. Zagrożenie jest podwójne. Wzrost temperatury musi być ograniczany i nie powinien spowodować samozapłonu oparów olejowo-paliwowych a czujniki temperatury powinny o tym ostrzegać. Działanie samych czujników nie może się przyczynić do eksplozji. Nie można dopuścić do wylądowań elektrostatycznych na obudowach czujników, a zasilające je obwody elektryczne z czujnikami powinny spełniać warunki iskrobezpieczeństwa.

Zgodnie z definicją obwodów iskrobezpiecznych podaną w normach EN 50 020 obwodem iskrobezpiecznym jest taki obwód elektryczny w którym pojawienie się iskry lub wytworzenie procesów termicznych stwarzających gorące powierzchnie nie spowoduje zapłonu substancji, pyłów i gazów łatwozapalnych prowadzących do eksplozji. Eksplozja ta nie wystąpi w stanach normalnej eksploatacji urządzeń oraz w ich stanach awaryjnych. Uważa się za obwód bezpieczny taki w którym napięcie nie przekracza 30V, a maksymalny prąd nie przekracza 50 mA. Jeśli moc wydzielona w obwodzie przekroczy 30W, a napięcie jest wyższe od 50V lub gdy prąd jest większy od 250mA prawdopodobieństwo wybuchu w atmosferze otaczającej jest wysokie i zależy od temperatury samozapalenia wg klas temperaturowych podanych np. w PN-84/E-08119. Ma również wpływ na wartości bezpieczne (dopuszczalne) prądu i napięcia, charakter obwodu: pojemnościowy lub indukcyjny, jak to jest przedstawione na rys. 9 [7].



Rys. 9. Maksymalne wartości prądu i napięcia dla obwodu iskrobezpiecznego

W systemach monitorowania, w technice iskrobezpiecznej, wykonano te elementy, które znajdują się w przestrzeniach zagrożonych wybuchem. Do takich systemów należy system przedstawiony na rys. 10.



Rys. 10. System monitorowania w przestrzeniach zagrożonych wybuchem

Stosowanie systemów monitorowania w przestrzeniach zagrożonych wybuchem powinno być poprzedzone znajomością przepisów normatywnych dyrektywy 94/9/WE dla EEA (Europejskiego obszaru Gospodarczego) potocznie zwanej ATEX (atmosfera wybuchowa). Dyrektywa ta jest dyrektywą „nowego podejścia” ustanawiającą zasadnicze wymagania bezpieczeństwa i ochrony zdrowia i pozostawiająca sprecyzowanie odpowiadających im wymagań technicznych zharmonizowanym normom krajowym i europejskim.

W dyrektywie, w opisie „Urządzeń” podkreśla się, że urządzenia iskrobezpieczne wchodzą w zakres obowiązywania tej dyrektywy. Dyrektywa obowiązuje w pierwszym rzędzie producentów odpowiednich systemów monitorowania, a także ich użytkowników. Aby sprostać wymaganiom dyrektywy należy zapewnić użytkowanie urządzeń (systemów pomiarowych) zgodnie z wymaganiami bezpieczeństwa i ochrony zdrowia. W tym celu należy przeprowadzić proces oceny ryzyka pod kątem zintegrowanego bezpieczeństwa przeciwybuchowego. Jest ono rozumiane jako zapobieganie powstawania atmosfer wybuchowych oraz źródeł zapłonu, jak również w razie wystąpienia wybuchu, natychmiastowe jego tłumienie lub ograniczenie jego skutków.

Dyrektywa 94/9/WE [6] uzupełnia dyrektywę dotyczącą kompatybilności elektromagnetycznej 89/336/EWG ponieważ zakłócenia elektromagnetyczne uważane za dopuszczalne mogą być przyczyną eksplozji w obszarach zagrożonych wybuchem. Wymagania i przepisy zasygnalizowane dla systemów monitorowania w atmosferze zagrożonej wybuchem dotyczą większości urządzeń stosowanych na obiektach rzeczywistych i w pracach eksperymentalnych, wyjątek stanowią tylko niektóre urządzenia wojskowe i sprzętu medycznego.

LITERATURA

- [1] Szumanowski, P. Piórkowski, A. Hajduga, K. V. Nguyen "The Approach to Proper Control of Hybrid Drive", EVS 17 Montreal, Kanada 2000
- [2] Szumanowski A., Hajduga A., Piórkowski P. "Evaluation of Efficiency Alterations in Hybrid and Electric Vehicles Drives" Proceedings of Advanced Propulsion Systems, GPC Detroit, USA 1998
- [3] Szumanowski A, A. Hajduga, P. Piórkowski, E. Stefanakos, G. Moore, K. Buckle "Hybrid Drive Structure and Powertrain Analysis for Florida Shuttle Buses", EVS16, Beijing, Chiny 1999
- [4] Materiały informacyjne przetworników firmy LEM
- [5] Materiały informacyjne firmy ESA Messtechnik GmbH
- [6] Dyrektywa Unii Europejskiej ATEX 100A dotycząca urządzeń i systemów ochronnych przeznaczonych do użytku w przestrzeniach zagrożonych wybuchem nr 94/9/EC.
- [7] Application Note AN9003: *A user's guide to intrinsic safety*, Measurement Technology Limited, Wielka Brytania, 1989.