

POMIAR MOMENTU OBROTOWEGO- PROPOZYCJA METODY UŚREDNIANIA

Przy badaniach obracających się zespołów i maszyn, głównie, ale nie tylko dla oceny ich zdolności wytwarzania mocy lub jej strat, potrzebny jest wiarygodny pomiar momentu obrotowego. Pomiar tej istotnej wielkości fizycznej towarzyszy nie tylko badaniom stanowiskowym, lecz wykorzystywany jest on również w seryjnych pojazdach samochodowych, chociażby w przekładniach kierowniczych czy do sterowania skrzyniami biegów[1]. Istnieje wiele czynników zakłócających ten pomiar. Część z nich w wielu przypadkach jest niemożliwa do zdefiniowania, a nawet pośród tych czynników zakłócających, które zostały określone, redukcja ich do poziomu w pełni zadawalającego jest z reguły niemożliwa. W związku z powyższym, sygnał momentu obrotowego często zostaje poddany różnego typu opracowaniu zanim zostanie np. wysłany do sterownika. W tym celu stosuje się m.in. rozmaite rodzaje filtrów bądź opracowania statystyczne, pośród których najprostszym przykładem jest uśrednianie arytmetyczne.

W artykule po przedstawieniu najpopularniejszych źródeł zakłóceń i metod walki z nimi, omówiona została propozycja metody uśredniania momentu obrotowego w trakcie pomiaru. Pomimo, iż pomiary z uśrednianiem wartości mierzonej z reguły mogą być stosowane do przebiegów statycznych/wolnozmiennych, opisana propozycja metody pomiaru nadaje się do pomiarów zmiennych/dynamicznych, gdyż uśrednianie zachodzi w ramach jednego obrotu wału.

Przedstawiono opis propozycji, przebiegi wartości momentu obrotowego bez jakiegokolwiek opracowania oraz z zastosowaniem autorskiej metody. W zakończeniu sformułowano wnioski wynikające z przedstawionych wyników badań.

WSTĘP

Pomimo postępu technologicznego dokonanego w ostatnich dziesięcioleciach w elektronice, automatyce jak i mechanice, wiarygodny pomiar momentu obrotowego, pozbawiony istotnych zakłóceń/wahań jest wyzwaniem wciąż trudnym do osiągnięcia.

Na przestrzeni lat stosowano i stosuje się momentomierze, których działanie oparte jest na różnych zjawiskach fizycznych. O samym pomiarze momentu obrotowego oraz typach momentomierzy można przeczytać w [2], [3],[4].

Niestety już ze sposobu działania wielu maszyn wynika nierównomierność dostarczanego lub pobieranego przez nie momentu obrotowego. Tak jest np. z czterosuwowym silnikiem spalinowym, na którego poszczególnych cylindrach, tylko w czasie jednego suwu wytwarzany jest moment obrotowy i to nie o stałej wartości- a w pozostałych trzech suwach moment jest odbierany. Zastosowanie koła zamachowego wygładza, ale nie likwiduje zmienności momentu na wale wyjściowym silnika spalinowego. W tym przykładzie cykl zamyka się w dwóch obrotach wału, w większości innych obiektów w jednym, jednakże, jeżeli wewnątrz maszyny zostaną zastosowane przekładnie czy mechanizmy krzywkowe to cykl przebiegu momentu obrotowego pozostanie funkcją prędkości obrotowej, ale będzie jej wielokrotnością całkowitą lub ułamkową.

W tym miejscu należy wyróżnić co najmniej trzy typy prowadzenia pomiaru i poszukiwania wartości momentu obrotowego:

- przypadek, gdy dokonywany jest pomiar w warunkach ustalonych. Poszukiwaną wartością jest wartość średnia z trwającego długo (wystarczająco dla uzyskania wartości średniej) testu,
- gdy interesującą wartością momentu obrotowego jest wartość momentu za cykl lub obrót wału, zmieniająca się wraz z prędkością obrotową wału,
- gdy szukaną wartością momentu obrotowego jest wartość chwilowa, np. przebieg momentu obrotowego w trakcie cyklu pracy.

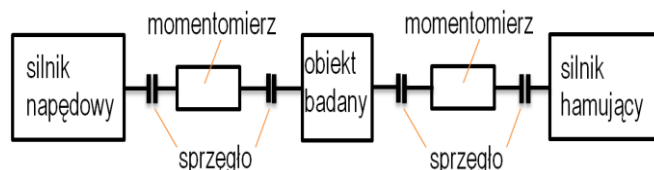
Prowadząc ostatnio badania zespołów przeniesienia napędu na zlecenie przemysłu motoryzacyjnego, napotkano na konieczność pomiaru momentu obrotowego dwóch pierwszych, pośród wyżej wymienionych typów.

Wobec wahań mierzonych wartości momentu obrotowego, w celu otrzymania poszukiwanych wartości momentu obrotowego dla pomiarów statycznych zastosowano uśrednianie arytmetyczne za pomocą wbudowanej funkcji oscyloskopu. Natomiast dla pomiarów zależnych od prędkości obrotowej, zastosowano opracowaną w Katedrze Pojazdów i Podstaw Budowy Maszyn Politechniki Łódzkiej propozycję uśredniania wartości momentu obrotowego zależną od aktualnej wartości prędkości obrotowej. Metoda ta zostanie przedstawiona w dalszej części niniejszego artykułu.

1. PRZYCZYNY ZAKŁÓCEŃ W POMIARACH

1.1. Stanowisko badawcze

Na rysunku 1 schematycznie przedstawiono konfigurację stanowiska badawczego podczas prowadzenia badań nad zespołami przeniesienia napędu. Zespół taki umieszczony jest na stanowisku badawczym, gdzie zarówno przed ja i za obiektem badanym znajdują się momentomierze, łączące obiekt z dwoma silnikami elektrycznymi, z których jeden napędza obiekt a drugi hamuje, pracując jako generator.



Rys. 1. Schematyczne przedstawienie stanowiska badawczego

- Istnieją dwie możliwości montażu przetworników momentu[2]:
- bezpośrednio na skręcanym wale- przetwornik wówczas właściwie nie przenosi obciążenia

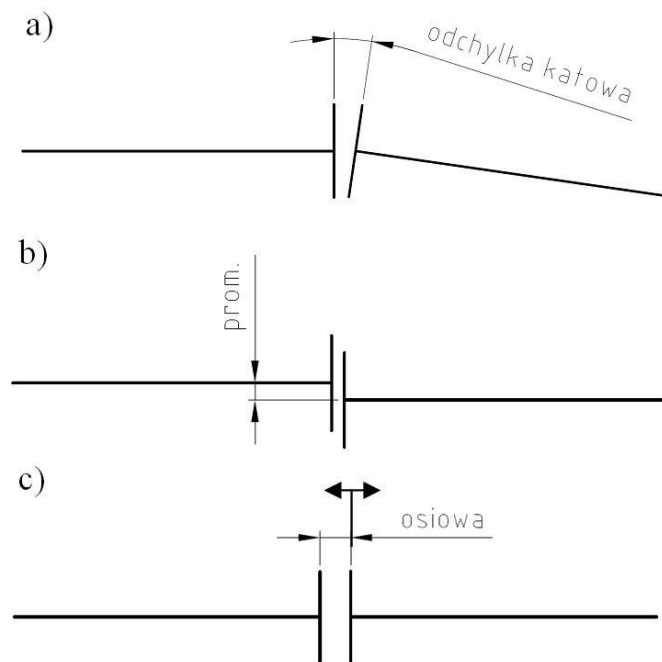
- włączając przetwornik szeregowo w układ- w takim przypadku cały przyłożony moment obrotowy jest przenoszony przez element torsyjny przyrządu pomiarowego i to jego odkształcenie stanowi informację o obciążeniu.

Na stanowisku, zastosowano montaż szeregowy, dużo popularniejszy, ponieważ opiera się na użyciu dostępnych w sprzedaży, gotowych przetworników momentu. Konieczne w takim przypadku jest użycie dodatkowych sprzęgieł.

1.2. Zakłócenia pochodzenia mechanicznego

Jako zakłócenia pochodzenia mechanicznego rozumie się wszelkie zjawiska pochodzenia mechanicznego, które pogarszają jakość pomiaru. Składają się na nie mogą wszelkiego rodzaju niewyważenia, nierównomierność pracy przekładni pracujących w układzie a przede wszystkim niedokładności montażowe, których podstawowe typy przedstawione zostały na rysunku 2. W rzeczywistości występuje złożenie wszystkich trzech typów odchyłek jednocześnie. Istnienie i wpływ tych zakłóceń na pomiar zostało wykazane w [3].

Oczywistym jest, że należy dążyć do maksymalnej redukcji wcześniej wspomnianych źródeł zakłóceń, poprzez prawidłowe ustawienie łączonych wałów czy wyważanie elementów obrotowych. Należy pamiętać, iż wszelkie niedokładności promieniowe narastają w kwadracie wartości prędkości obrotowej, zgodnie ze wzorem na siłę odśrodkową.



Rys. 2. Typy odchyłek montażowych: a) odchyłka katowa, b) odchyłka promieniowa, c) odchyłka osiowa

1.3. Zakłócenia pochodzenia elektrycznego

Poza zakłóceniami mechanicznymi wartości pomiarowe narażone są na zakłócenia pochodzenia elektrycznego. Można wyróżnić zakłócenia wynikające z nieprawidłowego (np. niestabilnego) napięcia zasilania, różnicy potencjałów na poszczególnych elementach stanowiska czy też zakłócenia elektromagnetyczne. W trakcie prowadzenia pomiarów należy zwracać szczególną uwagę na pojawiające się zakłócenia o częstotliwości 50Hz pochodzenia sieciowego.

Powszechnym źródłem zakłóceń elektrycznych są przemienniki częstotliwości. Podstawowymi zasadami redukcji zakłóceń pochodzących od przemienników częstotliwości są:

- stosowanie filtrów w instalacji elektrycznej zarówno po stronie wejściowej jak i wyjściowej,

- dobre uziemienie wszystkich urządzeń pracujących na stanowisku
- umieszczenie przemiennika częstotliwości w klatce Faradaya,
- stosowanie przewodów ekranowanych.

Dwie ostatnie metody polecane są ogólnie do stosowania w przypadku występowania zakłóceń elektromagnetycznych.

Jeżeli stwierdzono, że to napięcie zasilające aparaturę pomiarową powoduje zakłócenia skutecznym może być:

- zastosowanie filtrów sieciowych,
- sprawdzenie i ewentualna poprawa uziemienia wszystkich urządzeń pracujących na stanowisku,
- zastosowanie zasilacza awaryjnego (UPS) o możliwie dużej pojemności akumulatorów (pamiętając jednak w tym przypadku o zabezpieczeniu stanowiska przed zakłóceniami elektromagnetycznymi), lub jeżeli jest to możliwe przejść na czas prowadzenia badań na zasilanie akumulatorowe.

Innym rozwiązaniem na ograniczenie występowania zakłóceń elektrycznych jest stosowanie separacji galwanicznej i sprzężenia np. optycznego. Należy również pamiętać, aby o ile to jest możliwe, urządzenia na stanowisku posiadały wspólne napięcie odniesienia oraz uziemienie, tak aby nie występowały różnice potencjałów na poszczególnych elementach stanowiska.

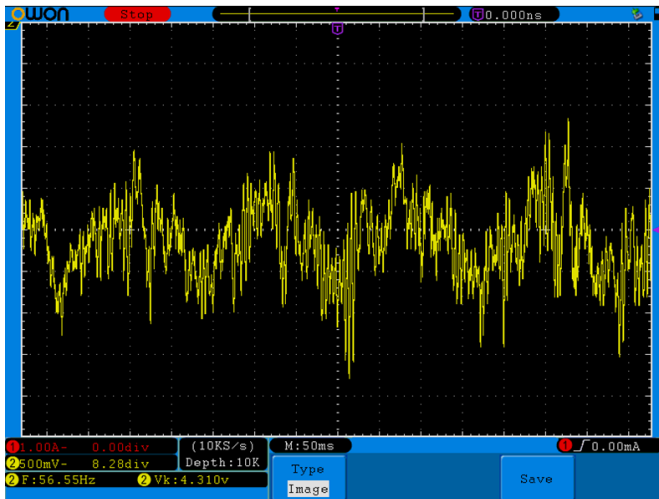
2. UŚREDNIANIE WARTOŚCI MIERZONEJ

2.1. Wprowadzenie

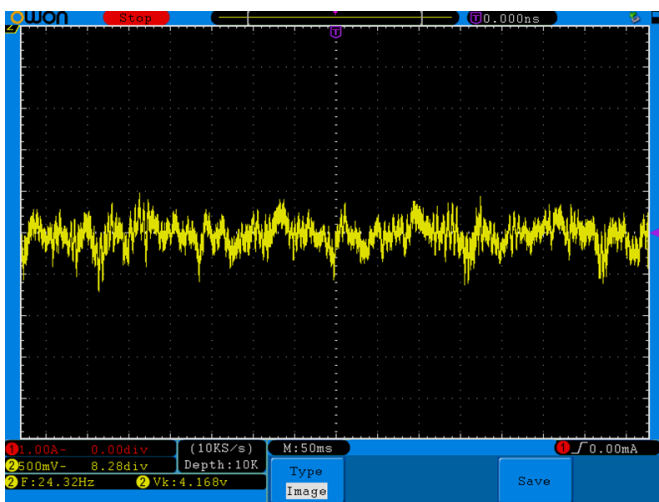
Ze względu na nieuniknione, wcześniej opisane zakłócenia zarówno mechaniczne jak i elektryczne, ale również wahania wskazania wartości momentu obrotowego wynikające z innych zjawisk (np. własności obiektu) może zachodzić potrzeba uśredniania otrzymywanych wyników badań, w celu dostarczenia wskazania momentu o ograniczonych wahaniami, aby np. umożliwić odczyt wartości z wyświetlacza cyfrowego.

W przypadku pomiarów statycznych (pierwsza grupa pomiarów spośród trzech, opisanych we wstępie) często wystarczającym jest zwykle uśrednianie arytmetyczne, którego dokonać można nawet za pomocą wbudowanych funkcji oscyloskopów cyfrowych, co zostanie wykazane na rysunkach 3,4,5 pochodzących z pomiarów własnych. Dokonano ich używając momentomierza tensometrycznego o zakresie 15Nm. Na każdym z niżej przedstawionych zrzutów ekranu z podłączonego oscyloskopu cyfrowego jedna kratka w pionie odpowiada 0,75Nm. Przebiegi te zarejestrowano bezpośrednio po sobie, przy tych samych warunkach na stanowisku.

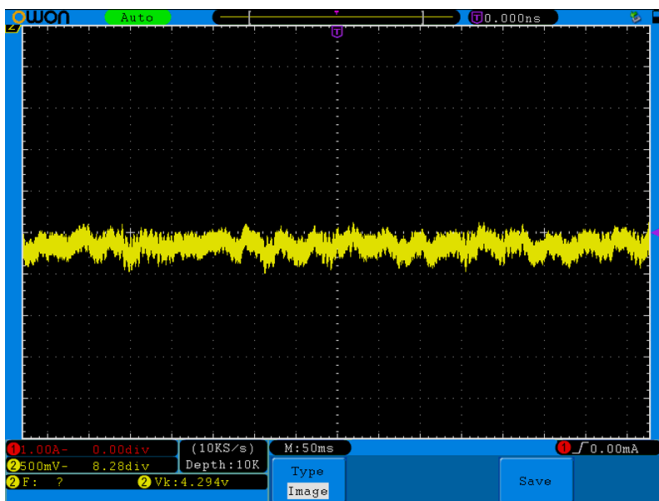
Uśrednianie n-krotne oznacza, iż wyświetlany na ekranie oscyloskopu przebieg w każdym punkcie jest średnią arytmetyczną z n wcześniej zarejestrowanych przebiegów. Dla przykładu: jeżeli w setnej milisekundzie z trzech poprzednich przebiegów zarejestrowano wartości 1V,1V,1V a w bieżącym przebiegu 5V, to wyświetlona zostanie wartość 2V (przy uśrednianiu 4-krotnym). Na tej samej zasadzie liczona jest wartość każdego punktu wyświetlanego na ekranie oscyloskopu.



Rys. 3. Przebieg momentu obrotowego bez uśredniania[3].



Rys. 4. Przebieg momentu obrotowego z uśrednieniem 4-krotnym[3].



Rys. 5. Przebieg momentu obrotowego z uśrednieniem 64-krotnym[3].

Jak można stwierdzić na podstawie przedstawionych przebiegów momentu obrotowego, nawet tak prosta metoda opracowywania sygnału może okazać się skuteczną. Wadą z pewnością jest fakt, iż im dłuższy okres uśredniania (a więc lepsze efekty) tym bardziej metoda ta ograniczona jest do użycia w pomiarach statycznych.

Analizując wahania momentu rejestrowane w trakcie badań, zauważono, iż decydujący wpływ na przebieg rejestrowanych wartości mają zakłócenia pochodzenia mechanicznego.

Wykonano test polegający na pomiarze oporów własnych stanowiska, przy wyłączonych maszynach elektrycznych[3] (wał napędzany z obcego, mechanicznego źródła) w celu zminimalizowania zakłóceń elektrycznych. Wyniki wskazywały, iż redukcja zaszumienia w stosunku do normalnej pracy stanowiska była nieznaczna.

Jak już wspomniano, powszechnymi źródłami zakłóceń są błędy montażowe bądź niewyważenia, a więc zakłócenia powtarzalne wraz z obrotem wału. Na rys. 6 przedstawione są wyniki pomiaru chwilowej wartości momentu obrotowego w trakcie dwóch obrotów wału (pomiar wykonany przy użyciu tego samego momentomierza jak w przypadku wcześniej przedstawionych wyników, lecz tutaj jedna kratka w pionie odpowiada 0,15Nm).



Rys. 6. Zrzut ekranu oscyloskopu, przedstawiający dwa obroty wału[3].

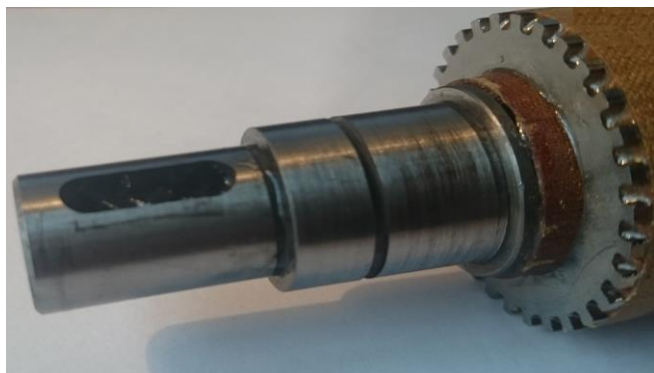
Jak można zobaczyć na rysunku 6, widoczna jest bardzo wyraźna powtarzalność w przebiegu, potwierdzająca wcześniejszą tezę.

Aby zapewnić uśredniony pomiar wartości momentu obrotowego przy zmiennej prędkości obrotowej, korzystne by było uśrednianie momentu obrotowego z czasu każdego obrotu.

Na podstawie powyższego spostrzeżenia opracowano w Katedrze Pojazdów i Podstaw Budowy Maszyn Politechniki Łódzkiej we współpracy z firmą Pracownia Elektroniki-Roman Pomianowski, metodę uśredniania wartości mierzonej w ramach obrotu wału.

2.2. Opis proponowanej metody uśredniania momentu obrotowego

W proponowanej metodzie, zamiast uśredniania wartości momentu obrotowego, odmierzając czas każdego obrotu (zmienny wraz ze zmienną prędkością obrotową), wykorzystano istniejące już na wale momentomierza tensometrycznego znaczniki służące do pomiaru prędkości obrotowej, widoczne na rysunku 7.



Rys. 7. Fragment wału momentomierza tensometrycznego opracowanego przez firmę Pracownia Elektroniki- Roman Pomianowski.

W tym przypadku, znaczników tych jest 30. Każdy z nich, w opisywanej metodzie uśredniania może zostać wykorzystany jako potencjalny trigger, dzięki któremu zostanie wyliczona średnia wartość momentu obrotowego z ostatniego obrotu.

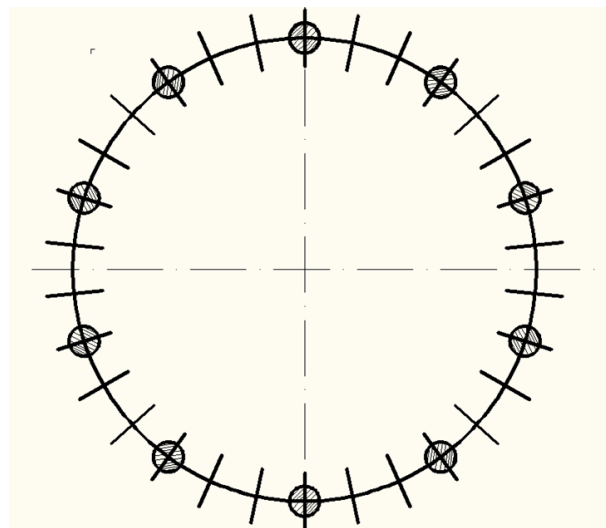
Idea działania niniejszego rozwiązania korzysta z faktu, iż oprogramowanie momentomierza posiada dwukolumnową tablicę danych o liczbie wierszy równej liczbie wcześniej wspomnianych znaczników. W każdej z dwóch kolumn zapisywana jest dla każdego (wiersza) znacznika liczba próbek zapisanych od poprzedniego znacznika oraz suma wartości momentu obrotowego z próbek. Zabieg taki tworzony w trakcie obrotu wału dla każdego znacznika. Również na każdym z nich, z racji występowania rejestru przesuwającego każdy wiersz przenoszony jest o jedną pozycję w dół tabeli. Ostatni wiersz jest więc kasowany, a w pierwszym zapisywane są nowe wartości.

Ponadto, przy mijaniu każdego znacznika z owej tablicy danych wyliczana jest bieżąca średnia arytmetyczna poprzez zsumowanie liczb z wszystkich wierszy zawierających liczby próbek oraz sumy ich wartości. W ten sposób tworzy się średnia krocząca wartości momentu obrotowego z ostatniego pełnego obrotu.

Maksymalna częstotliwość próbkowania systemu pomiarowego to 1600Hz. Wiąże się z tym pewne ograniczenie funkcjonalności, ponieważ zawsze, dla poprawnego działania systemu konieczne jest aby pomiędzy znacznikami zarejestrowana była co najmniej jedna próbka z danymi. Zakładając ową częstotliwość maksymalną systemu oraz liczbę znaczników równą 30, prędkość obrotowa momentomierza ograniczona byłaby do 3200obr/min, co prezentują poniższe wyliczenia:

$$n_{max} = \frac{1}{30} \frac{obr}{s} = \frac{1600}{30} \left[\frac{obr}{s} \right] = \frac{1600}{30} \cdot 60 \left[\frac{obr}{min} \right] = 3200 \frac{obr}{min} \quad (1)$$

Konstrukcja momentomierza przystosowana jest do pracy również przy większych wartościach prędkości obrotowej. Aby proponowana metoda uśredniania nie ograniczała możliwości pomiarowych momentomierza zdecydowano się na wykorzystanie do uśredniania momentu obrotowego co trzeciego znacznika prędkości obrotowej, co przedstawiono schematycznie na rys. 8, gdzie naniesiono 30 znaczników, wykorzystywanych do pomiaru prędkości obrotowej, a zakreśowanymi kółkami zaznaczone te, które są wykorzystywane przy uśrednianiu momentu obrotowego.



Rys. 8. Schematyczne rozmieszczenie znaczników na obwodzie wału momentomierza

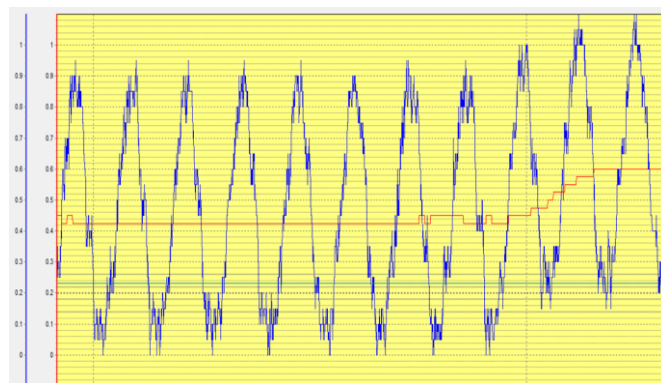
Wykorzystanie co trzeciego znacznika prędkości pozwoliło na podniesienie maksymalnej prędkości obrotowej, przy której system pracuje prawidłowo do 9600obr/min, co w pełni wyczerpuje możliwości momentomierza.

Ostatecznie więc, wspomniana wcześniej tablica danych posiada 10 wierszy, a na każdym, co trzecim znaczniku prędkości obrotowej, zapisywana jest liczba próbek z 1/10 obrotu oraz suma ich wartości.

Inne ograniczenie systemu występuje przy bardzo niskiej wartości prędkości obrotowej. Jest to powodowane przepełnieniem tablicy danych, ze względu na fakt, iż przy niskich prędkościach obrotowych pomiędzy znacznikami rejestrowane jest wiele próbek. Przy dostępnym buforze danych i wspomnianej częstotliwości próbkowania minimalna prędkość obrotowa, która wystarczy dla poprawnego działania systemu to 0,37obr/min.

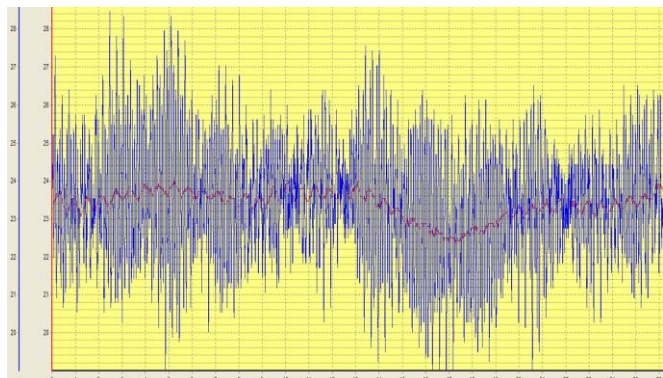
2.3. Wyniki pomiarów z zastosowaniem proponowanej metody

Przy użyciu opisywanego uśredniania oraz zakłócenia w pełni powtarzalnych, można by oczekiwać zupełnej eliminacji szumów pochodzenia mechanicznego. Wyniki badań dla takiego typu zakłócenia, wytwarzanego celowo mechanizmem krzywkowym przedstawiono na rys. 9. Widoczny jest na nim zrzut ekranu z programu współpracującego z wcześniej wspomnianym momentomierzem. Kolorem niebieskim oznaczono przebieg momentu obrotowego bez uśredniania, natomiast kolorem czerwonym- przebieg momentu z zastosowaniem opisywanej metody uśredniania.



Rys. 9. Przebieg momentu obrotowego bez uśredniania (linia niebieska) oraz z proponowanym uśrednianiem (linia czerwona)[5]

Zgodnie z oczekiwaniami, w wyniku zastosowania proponowanego uśredniania uzyskano przebieg momentu niemal wolny od zakłóceń. Aby zweryfikować przydatność proponowanej metody w warunkach rzeczywistych, wykonano test na stanowisku badawczym, służącym do badania podzespołów napędowych. Wyniki tegoż testu przedstawiono na rysunku 10. Oznaczenie linii jak w poprzednim przypadku.



Rys. 10. Przebieg momentu obrotowego bez uśredniania (linia niebieska) oraz z proponowanym uśrednianiem (linia czerwona)

W tym przypadku, gdy zakłócenia nie były wywoływane w sposób sztuczny, a na pomiar składały się również wszystkie czynniki wymienione w pierwszym rozdziale niniejszego opracowania, nie otrzymano linii idealnie prostej, jednakże uzyskana poprawa przebiegu krzywej jest wyraźna.

Warto zauważyć, iż w stosowanym układzie pomiarowym z momentomierza do wzmacniacza wychodzi sygnał w postaci cyfrowej, charakteryzujący się dużą odpornością na zakłócenia. Zamiana sygnału z analogowego na cyfrowy zachodzi w samym momentomierzu, którego obudowa tworzy swego rodzaju klatkę Faradaya, co również przyczynia się do osiągnięcia pomiarów momentu obrotowego o mniejszych zakłóceniach.

PODSUMOWANIE

Na podstawie przedstawionych rozważań i wyników badań należy stwierdzić iż:

- pomimo rozwoju przyrządów pomiarowych i ich różnorodności pomiar momentu obrotowego wciąż narażony jest na szereg zakłóceń, których minimalizacja jest procesem trudnym i czasochłonnym,
- zakłócenia pochodzenia mechanicznego, w tym powodowane samym układem przeniesienia napędu na stanowisku odgrywa istotną rolę w sumarycznym rozkładzie zakłóceń, a często są pomijane w obliczu powszechnie branych pod uwagę zakłóceń pochodzenia elektrycznego,
- zaproponowana metoda uśredniania wartości mierzonej momentu obrotowego wydaje się być dobrą i skuteczną alternatywą dla rozmaitego typu filtrów czy skomplikowanych opracowań

statystycznych. Niewątpliwą zaletą tego rozwiązania jest możliwość zastosowania do przebiegów szybkochylnych.

BIBLIOGRAFIA

1. BOSCH, Czujniki w pojazdach samochodowych, WKiŁ, Warszawa 2014.
2. Kamiński M., Czujniki momentu obrotowego, „Pomiary Automatyka Robotyka” 2012, nr 5.
3. Goszczak J., Torque Measurement Issues, „IOP Conference Series: Materials Science and Engineering” 2016, Vol. 148.
4. Naruszewicz W., Automatyka B2B, 2007. Dostęp: 6.03.2017 <http://automatykab2b.pl/technika/760-pomiary-momentu-obrotowego#.V0GL3uR34hS>
5. Pomianowski R., Raport, 2016.
6. KTR, Dostęp: 24.02.2017. <https://www.ktr.com/fileadmin/ktr/media/Manuals/49011pl000000.pdf>

PODZIĘKOWANIA

Autorzy niniejszego artykułu składają serdeczne podziękowania Panu Romanowi Pomianowskiemu, właścicielowi firmy Pracownia Elektroniki z Poznania za konstruktywną współpracę, której wynikiem mogą być prezentowane wyniki badań.

Torque measurement- proposal of data averaging method

Reliable and repeatable torque measurement is a crucial issue during every research and in every kind of system which operation is based on torque value. Although the progress is done in the science last years, accurate torque measurement is still a problematic issue.

After discussing the most popular sources of noise, article describes the authors' proposal of torque value averaging method during the tests. Despite the fact, that the most of averaged measurements can be used in the static processes, this method is useful also in dynamic measurements because the averaging is performed within one revolution.

Description of the method is included, test results without and with proposed data averaging are presented. Summary contains conclusions based on the presented results.

Autorzy:

mgr inż. **Jarosław Goszczak** – Politechnika Łódzka, Katedra Pojazdów i Podstaw Budowy Maszyn, jaroslaw.goszczak@p.lodz.pl

mgr inż. **Bartosz Radzyński** – Politechnika Łódzka, Katedra Pojazdów i Podstaw Budowy Maszyn, bartosz.radzynski@p.lodz.pl

dr inż. **Andrzej Werner** – Politechnika Łódzka, Katedra Pojazdów i Podstaw Budowy Maszyn, andrzej.werner@guest.p.lodz.pl