

Prototypowe urządzenie do pomiaru zmian indukcji generowanej przez obracające się koło samochodowe

Sebastian Brol, Agnieszka Szegda

Politechnika Opolska, Wydział Mechaniczny, ul. St. Mikołajczyka 5, 45-271 Opole

Streszczenie: W artykule przedstawiono prototypowe urządzenie do pomiaru zmian indukcji generowanej przez obracające się koło samochodowe. Omówiono koncepcję kinematyczną, budowę mechaniczną oraz system sterujący i pomiarowy, który bazuje na dwóch współpracujących ze sobą mikrokontrolerach 8-bitowych. Opisano trzy główne tryby pracy systemu pomiarowego. Ostatecznie przedstawiono także zmiany indukcji magnetycznej w polu geomagnetycznym wywołane przez obracające się koła samochodowe, zarejestrowanej w kierunku promieniowym do pionowej osi obrotu.

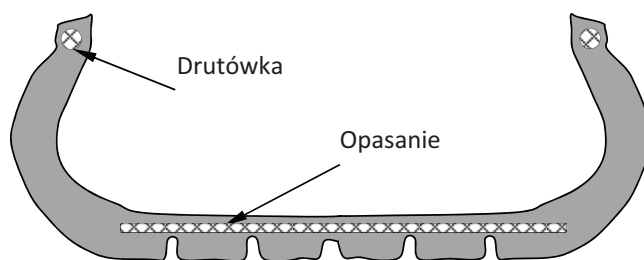
Słowa kluczowe: indukcja magnetyczna, koło samochodowe, urządzenie prototypowe, system pomiarowy

1. Wprowadzenie

Badania drogowe realizowane z użyciem prototypowego urządzenia PAAF (ang. *Power Acceleration And Force*) [1], które wykorzystuje zespół sensorów składający się między innymi z czujnika magnetycznego [2], ujawniło zdeterminowane zaburzenia pola magnetycznego. Miały one okresowy charakter, a częstotliwość zakłóceń zależała od prędkości obrotowej kół samochodu [3, 10]. Co więcej, stwierdzono, że częstotliwość zakłócenia mogła być wielokrotnością częstotliwości obracającego się koła. Sprawdzenie pod kątem indukcji składników układu jezdnego wykazało, że za zmiany pola magnetycznego odpowiada w największym stopniu opona samochodowa. Na podstawie jej budowy można stwierdzić, że w szczególności pole magnetyczne mierzone w pewnej odległości od opony zmieniają pokazane na rys. 1 elementy ferromagnetyczne [4, 5], jak opasanie i drutówka.

Publikacje naukowe poświęcone tej tematyce nie są zbyt obszerne i dotyczą głównie aspektów medycznych związanych z eksploatacją pojazdów przez kierowcę i pasażerów. Koncentrowały się zwykle na badaniu wpływu niskoczęstotliwościowego pola magnetycznego na stan kierującego i osób transportowanych [6]. Zmiany pola magnetycznego o częstotliwości od 1 Hz do 15 Hz uznano za niebezpieczne, mimo że indukcja mierzona w kabinie (w różnych miejscach) nie przekraczała kilkudziesięciu μT . Zwrócono także uwagę, że po rozmagnesowaniu opony w czasie kilku miesięcy powracało jej namagnesowanie, jeśli była

eksploatowana. Prace naukowe z obszaru metrologii koncentrowały się na wykorzystaniu pola magnetycznego do pomiaru prześwitu samochodu na podstawie odległości koła od nadkola [7]. Najnowsze wysiłki badawcze koncentrowały się na wykorzystaniu pola magnetycznego do pomiaru prędkości obrotowej oraz poślizgu koła ogumionego [10]. Badania wykazały, że generalnie jest to możliwe. Wyniki prac opatentowano [11]. Znane są także inne rozwiązania patentowe dotyczące metod pomiaru prędkości obrotowej koła ogumionego, ale opisują one wyniki uzyskane z oponami z celowo wytworzonym polem magnetycznym za pomocą cewki [12, 13].



Rys. 1. Elementy opony samochodowej

Fig. 1. Parts of tyre

W konstrukcji robotów mobilnych lądowych wykorzystywanych jest dużo rozwiązań układu jezdnego. Od gąsienicowego począwszy, przez wielokołowe, na dwukołowych skończywszy. Wiele tych konstrukcji używa kół samochodowych (rys. 2).

Podsumowując stan wiedzy można zauważyć, że:

- 1) możliwy jest zdalny pomiar prędkości kątowej obracających się kół samochodowych,
- 2) koła samochodowe wykorzystywane są do budowy robotów mobilnych,
- 3) informacja o chwilowej prędkości kątowej kół może zostać wykorzystana jako informacja do obliczenia poślizgu oraz jako informacja redundantna zwiększająca niezawodność i bezpieczeństwo eksploatacji robota mobilnego.

Autor korespondujący:

Sebastian Brol, s.brol@p.opole.pl

Artykuł recenzowany

nadesłany 08.02.2017 r., przyjęty do druku 21.03.2017 r.



Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 3.0



Rys. 2. Robot mobilny [14]
Fig. 2. Unmanned autonomous vehicle

2. Cel pracy

Podstawowym pytaniem, na które autorzy szukają odpowiedzi jest – w jaki sposób mierzyć indukcję magnetyczną opon i kół samochodowych, aby uzyskać sygnał użyteczny do określenia prędkości obrotowej koła. W tym artykule omówiono prototyp urządzenia służącego do tego celu.

3. Koncepcja i konstrukcja przyrządu

Pomiary indukcji magnetycznej można dokonywać za pomocą sensorów zestawionych w tabeli 1.

Tabela 1. Zestawienie wybranych rodzajów sensorów indukcji i ich magistral
Table 1. Set of induction sensors and their buses

Magistrala	Zjawisko	Zakres [15]
A, B	Indukcja magnetyczna	$< 1 \text{ nT} < 1 \text{ T}$
A, B, I ² C, PWM, SPI, CAN	Halla	$< 1 \text{ mT} < 1 \text{ T}$
A, B, I ² C, PWM, SPI	Magnetorezystancja	AMR $< 1 \text{ nT} < 1 \text{ mT}$ GMR $< 1 \text{ nT} < 1 \mu\text{T}$ TMR $< 1 \text{ nT} < 1 \text{ mT}$

A – sygnał analogowy,
B – sygnał binarny kodowany cyfrowo.

Na podstawie danych zamieszczonych w tabeli 1 można wyciągnąć wniosek, że do pomiaru sygnału o amplitudzie zbliżonej do wartości pola magnetycznego Ziemi można zastosować sensory magnetorezystancyjne.

3.1. Założenia

Podczas pomiarów realizowanych w testach drogowych [10] uzyskiwano od 632 pomiarów indukcji na obwodzie koła przy prędkości 3,6 m/s (10 km/h) do 32 pomiarów przy prędkości 55,5 m/s (200 km/h). Założono, że przyrząd powinien umożliwić uzyskanie rozdzielczości większej niż 1000 próbek indukcji na obrót koła, czyli uzyskiwać rozdzielczość kątową mniejszą niż 0,0062 rad.

Ze względu na rozbieżności wartości maksymalnych i minimalnych indukcji wywołanej przez obracające się koło i mierzonej w pojeździe [3] oraz ze względu na możliwą nieliniową

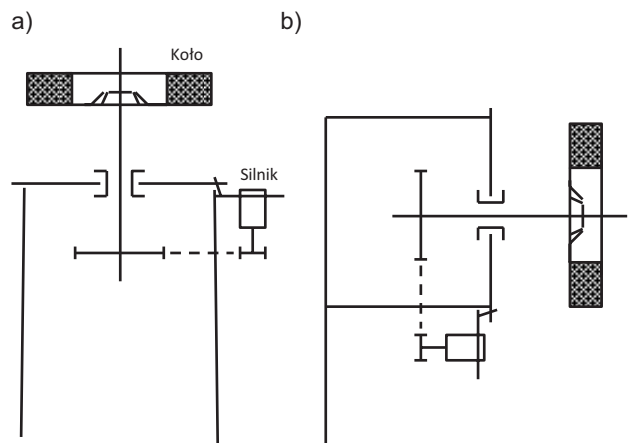
zmianę indukcji magnetycznej wraz ze zmniejszaniem się odległości do elementu magnetycznego, zdecydowano się zastosować sensor o ustalonym przed pomiarem (programowanym) zakresie pomiarowym. Dodatkowo ze względu na to, że pomiary dokonywane są w obecności pola magnetycznego Ziemi, mogącego charakteryzować się (np. w Polsce) znaczną oraz zmienną inklinacją i deklinacją magnetyczną, dobrano sensor umożliwiający pomiar trzech składowych wektora indukcji.

Założono także, że przyrząd będzie mierzył zmiany indukcji wywołane przez obracające się koło lub oponę w polu geomagnetycznym, aby jak najwierniej naśladować warunki pomiaru w pojeździe.

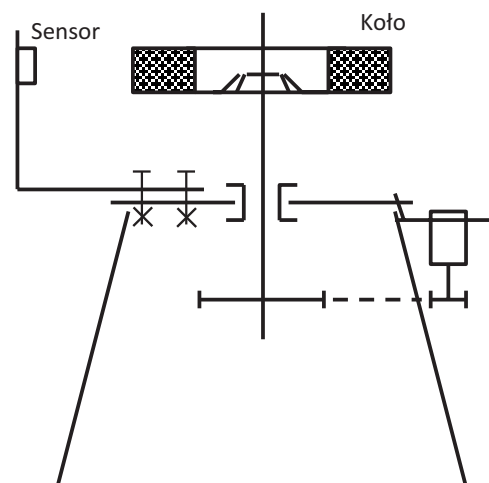
3.2. Koncepcja mechaniczna

Z uwagi na to, że pomiary indukcji odbywać się będą w polu magnetycznym Ziemi rozważono dwa warianty zorientowania osi obrotowej obiektu badanego (poziomy i pionowy) oraz dwa warianty ruchu względnego sensora względem koła lub opony (nieruchomy obiekt i obracający się sensor oraz obracający się obiekt i stacjonarny sensor).

Ostatecznie wybrano rozwiązanie umożliwiające pomiar (po zamontowaniu do specjalnych uchwytów) w dowolnej orientacji względem pola magnetycznego Ziemi, jednak pozostano przy koncepcji obracającego się koła i nieruchomym sensorze z powodu podobieństwa układu do aranżacji w robocie mobilnym lub pojeździe (rys. 3). Co więcej, w robocie mobilnym



Rys. 3. Koncepcje urządzenia do pomiaru indukcji z pionową (a) i poziomą (b) osią obrotu
Fig. 3. Conceptions of device for measurement of induction with vertical (a) and horizontal (b) axis of rotation



Rys. 4. Schemat kinematyczny urządzenia
Fig. 4. Schematics of device

kołowym korzystnie jest, z uwagi na prostotę konstrukcji, przytworzyć sensor do wahacza, kadłuba lub ramy.

Dodatkowo przyjęte rozwiązanie ruchu względnego w przypadku przyrządu ułatwia dostęp z każdej strony do opony oraz upraszcza konstrukcję, szczególnie ze względu nałożyskowania wrzeciona. Finalnie przyrząd skonstruowano tak, że tarcza wraz z wrzecionem wsparta jest na trzech nogach (rys. 4).

Przyrząd wyposażono w proste ramię. Jego zadaniem jest stworzenie stabilnej konstrukcji dla mocowania czujnika oraz umożliwienie rozbudowy przyrządu o mechanizmy do ustalania położenia i ewentualnie orientacji sensora indukcji.

4. Układ sterowania i układ pomiarowy

Uzyskanie założonej przez operatora kątowej rozdzielczości pomiarowej (nie większej niż 0,0062 rad) wymaga skojarzenia częstotliwości wysyłania danych przez sensor oraz prędkości obrotowej badanego koła lub opony. W tym celu niezbędne jest sterowanie prędkością obrotową wrzeciona. Wybrano sterowanie elektryczne silnikiem prądu stałego, szczotkowym z magnesami trwałymi. W konsekwencji należy się liczyć z wprowadzeniem pewnego pola magnetycznego w obszar pomiarowy. Aby ograniczyć jego wpływ, zastosowano ekranowanie sterownika, przewodów łączących z silnikiem i samego silnika za pomocą blach aluminiowych. Dodatkowo zdecydowano się na zastosowanie dwóch odrębnych sterowników do realizacji funkcji sterowania i pomiarowej. Umożliwia to swobodę montażu sterowników i ich osprzętu oraz minimalizację wpływu pól magnetycznych generowanych podczas sterowania obrotem koła na pomiar.

Indukcja skończenie długiego przewodu przewodzącego prąd elektryczny zgodnie z prawem Biota-Savarta (1) wynosi:

$$B = \frac{\mu_p I}{4\pi R} (\cos(\varphi_1) - \cos(\varphi_2)) \quad (1)$$

gdzie: B – indukcja magnetyczna, μ_p – przenikalność bezwzględna powietrza, I – natężenie prądu elektrycznego, R – odległość od przewodu, φ_1, φ_2 – położenie kątove początku i końca przewodu w odniesieniu do prostopadłego odcinka o długości R , na końcu którego znajduje się punkt, dla którego obliczana jest indukcja B .

Zgodnie z zależnością (1) indukcja maleje w sposób zbliżony do wykładniczego wraz z odległością. Przy natężeniu 1,25 A i odległości 40 cm, indukcja wynosi $B = 5 \times 10^{-7}$ T, a dla prądu $I = 4$ A indukcja $B = 17 \times 10^{-7}$ T. Co więcej, możliwe jest uzyskanie separacji 40–60 cm lub większej między silnikiem, jego przewodami a czujnikiem. Dodatkowo indukcja w odległości 60 cm (4×10^{-7} T) dla prądu $I = 1,25$ A jest nawet 10 razy mniejsza niż rejestrowana w pojeździe w badaniach [10].

Prąd o natężeniu $I = 1,25$ A odpowiada obciążeniu przy ustalonej, maksymalnej prędkości obrotowej silnika podczas pomiaru, natomiast $I = 4$ A występuje tylko chwilowo podczas rozpędzania lub hamowania i nie płynie podczas pomiaru. Zdecydowano się, oprócz zastosowania ekranowania podczas pomiaru, utrzymywać prąd mniejszy lub równy 1,25 A.

Układ sterowania obejmuje mikrokontroler ATmega328 wraz z mostkiem H do sterowania silnikiem prądu stałego. Ponieważ sterowanie prędkością obrotową odbywa się w jednym kierunku, przewidziano wyprowadzenie wyjścia impulsowego ze sterownika pomiarowego do sterującego po to, aby zliczać w czasie każde zbocze wyjścia impulsowego odpowiadające zmianie stanu sygnałów enkodera inkrementalnego. Dzięki temu możliwy jest pomiar prędkości obrotowej w celu realizacji regulacji stałowartościowej prędkości obrotowej wrzeciona i obliczanie położenia kątowego, a w konsekwencji kontrolowanie rozpędzania i hamo-

wania w celu ograniczenia natężenia prądu elektrycznego i ograniczenia stycznych działających w punkcie mocowania koła do wrzeciona (zapobieganie poślizgowi).

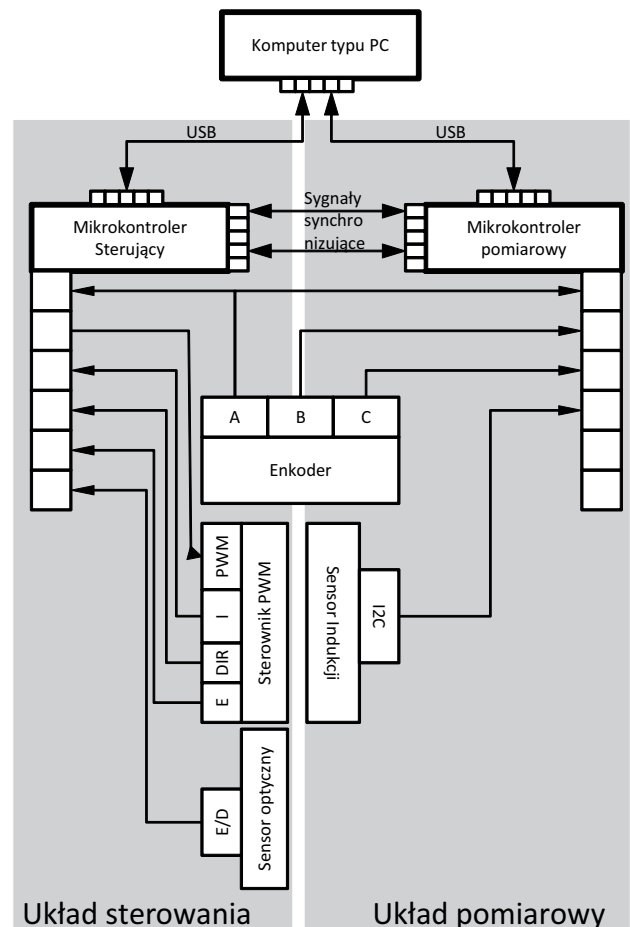
Układ pomiarowy składa się z mikrokontrolera ATmega328 oraz połączonego z nim trzypoosiowego sensora indukcji magnetycznej. Sensor połączony jest z mikrokontrolerem za pomocą magistrali I²C. Częstotliwość pomiarów (trzech składowych wektora \mathbf{B}) można ustalać w granicach od 1,5 Hz do 75 Hz (a w trybie pojedynczego pomiaru do 160 Hz). Zakres pomiarowy sensora można ustalać w zakresie od $\pm 2,5 \times 10^{-4}$ T do $\pm 8,1 \times 10^{-4}$ T z rozdzielczością 12 bit. Oba układy przedstawiono schematycznie na rys. 5.

Pomiar odbywa się w trzech trybach:

- 1) Pomiar z zadaną szybkością przesyłania danych – 10 Hz.
- 2) Pomiar w czasie jednego obrotu z zadaną prędkością przesyłu danych i zadaną prędkością obrotową wrzeciona – początek i koniec pomiaru wyzwalane są przez następujące po sobie zbocza narastające sygnału dwustanowego z sensora optycznego.
- 3) Pomiar w czasie jednego obrotu z zadaną prędkością obrotową – początek i koniec pomiaru wyzwalane są przez sensor optyczny po uzyskaniu stabilnej prędkości obrotowej. Wyzwalanie próbkowania realizowane jest przez zbocze narastające sygnału z enkodera.

4.1. Tryb 1

Ten tryb jest stosowany do pomiarów indukcji w zadanym położeniu koła albo w konkretnym miejscu (nawet konstrukcji przyrządu). W tym celu przyrząd przystosowano do użycia dwóch sensorów. Jeden sensor jest na stałe zamocowany w przyrządzie, a drugi po wyciągnięciu wtyczki z sensora można podłączyć za pomocą wolnego już kabla i realizować



Rys. 5. Schemat blokowy układu sterowania i pomiarowego
Fig. 5. Block schematics of measurement and control systems

pomiary ręcznie. Zmiana sensora wymaga jedynie wprowadzenia wielkości korekcyjnych dla przesunięcia i wzmocnienia. To rozwiązanie okazało się niezwykle praktyczne podczas montażu i ustawiania przyrządu w izbie pomiarowej, gdy istniała potrzeba sprawdzenia indukcji wymienianych elementów urządzenia. Dodatkowo można za pomocą tego rozwiązania dokonać wstępnych pomiarów indukcji obiektów badań lub mierzyć w miejscach i kierunkach trudno dostępnych, gdy obiekt badany zamocowany jest na przyrządzie.

4.2. Tryb 2

Służy do pomiarów dokonywanych na obwodzie koła. Jest realizowany w funkcji czasu, a nie kąta. Jego celem jest wstępna ocena amplitudy rejestrowanych zmian indukcji magnetycznej.

Kontrola rozdzielczości zależy od nastaw wprowadzonych przez operatora – wartości zadanej prędkości obrotowej oraz częstotliwości pomiaru. Oczywiście, częstotliwość pozyskiwania nowych próbek należy dobrać w zależności od przyjętej rozdzielczości obwodowej pomiaru, inercji elementu aktywnego sensora, od zastosowanej magistrali oraz prędkości obrotowej koła.

4.3. Tryb 3

Jest to właściwy tryb pomiarowy. Wartości indukcji zbierane są w funkcji kąta obrotu wrzeciona. Rozdzielczość kątowa zależy od zastosowanego enkodera oraz od sposobu przetwarzania jego sygnałów.

W tym rozwiązaniu wybrano enkoder inkrementalny z tarczą o 1024 podziałach na obrót. Do obliczania przyrostu kąta zastosowano algorytm zwiększający wartość o jeden wraz z każdą działką. Prędkość obrotowa wrzeciona ustalana jest przez operatora z zakresu od 0,5 obr./min do 5,5 obr./min. W ten sposób minimalizowane są niekorzystne zjawiska dynamiczne, jak opóźnienie rejestrowanego sygnału w stosunku do wartości rzeczywistych.

5. Wyniki badań

Badania zmian pola magnetycznego dokonano za pomocą opisanego przyrządu. Wykorzystano drugi tryb pomiarowy. Prędkość obrotową wrzeciona ustalono na 0,57 rad/sek (5,5 obr./min). Częstotliwość przesyłania danych z czujnika indukcji wybrano na równą 75 Hz, co przy prędkości obrotowej 0,57 rad/s daje 810 pomiarów składowych wektora **B** na obrót. Odpowiada to rozdzielczości kątowej 0,0077 rad (0,44°). Badano koła o obręczy stalowej 14" z założonymi oponami o szerokości 195 mm i wysokości równej 45% szerokości. Zmierzony promień swobodny koła (patrz np. w [8, 9]) wyniósł 1666 ± 3 mm. Pomiary składowych wektora **B** odbywały się więc co 2,05 mm mierząc po obwodzie koła. Sensor ulokowano 55 mm nad środkiem bieżnika, a jego zakres pomiarowy ustalono na ± 8 × 10⁻⁴ T.

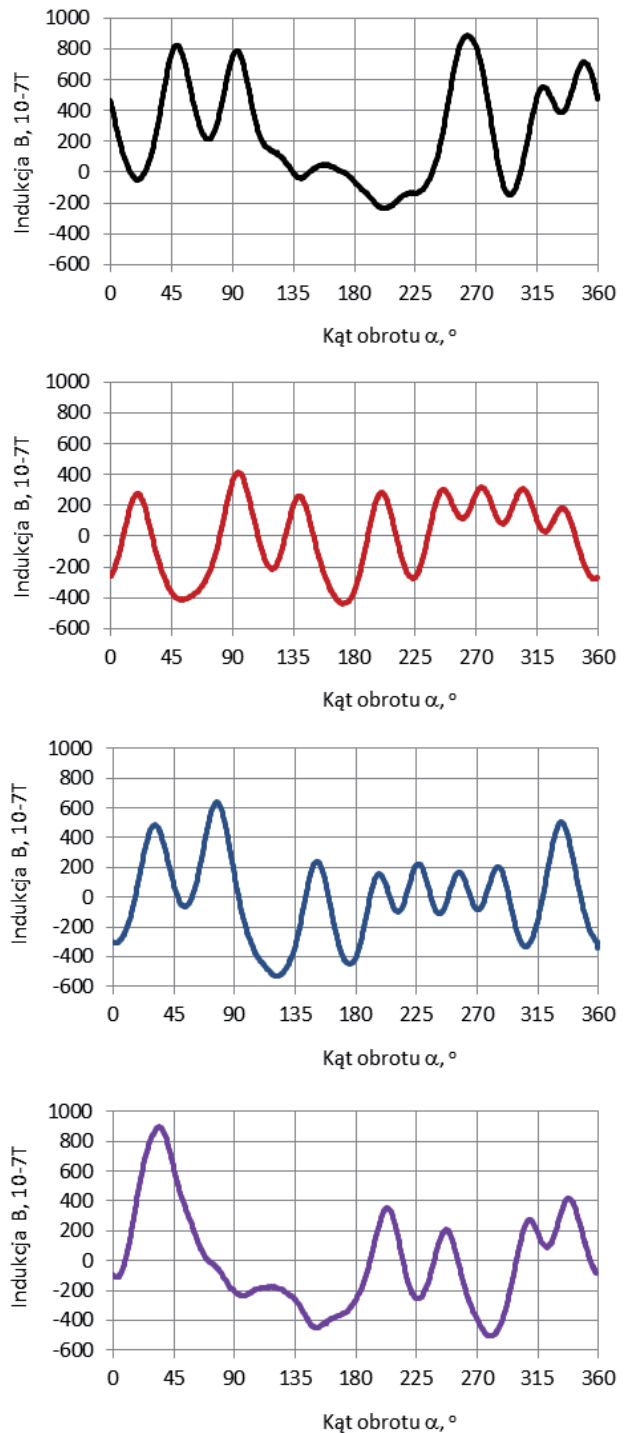
Koła eksploatowane były w jednym samochodzie przez pół roku. Wyniki pomiarów zmian indukcji dla czterech opon, przy zastosowaniu trybu 2, pokazano na rys. 6.

Rejestrowano zmiany składowej promieniowej do osi obrotu koła w płaszczyźnie poziomej.

Jak można zauważyć przebiegi różnią się dla opon przednich i tylnych oraz dla lewych i prawych. Indukcja magnetyczna w każdym z przypadków przechodzi przez wartość zero, ale pozostałe wartości przesunięte są w kierunku wartości dodatnich a więc tych, które skierowane są w kierunku promieniowym. Takie obserwacje sugerują wpływ pola geomagnetycznego na wyniki pomiaru.

6. Wnioski

W wyniku przeprowadzonych testów można sformułować następujące wnioski:



Rys. 6. Profile magnetyczne: koła przedniego lewego a), przedniego prawego b), oraz lewego tylnego c), i tylnego prawego d). Pomiary realizowano stosując tryb 2

Fig. 6. Magnetic profiles of: left front (a), right front (b), right rear (c), and left rear (d) wheel. Measurements were done using second mode of operation

- 1) Konstrukcja przyrządu umożliwia rejestrację zmian indukcji magnetycznej wywołanej przez obracające się koło samochodowe w polu geomagnetycznym.
- 2) Ze względu na użycie sensora trzyosiowego możliwy jest pomiar w dowolnym kierunku.
- 3) System pomiarowy przystosowany jest do czujników z magistralą analogową oraz cyfrową. Zakres pomiarowy zależy od zastosowanego czujnika. W tej chwili można go ustalać w zakresie od ± 1,5 × 10⁻⁴ T do ± 8 × 10⁻⁴ T.
- 4) Sensor indukcji może być stosowany do pomiarów ręcznych oraz w trybie automatycznym.

- 5) Układ pomiarowy można oddalić zarówno od mierzonego przedmiotu jak i od układu sterującego na odległość wystarczającą do znacznej redukcji sygnału zakłócającego.
- 6) Jak wykazały obliczenia, rozważana koncepcja rozdzielenia układu sterowania od pomiarowego okazała się słuszną. Indukcja magnetyczna oddziałująca na układ pomiarowy jest kilka rzędów mniejsza niż wartości mierzone.

Bibliografia

1. Brol S., *Wybrane aspekty procesu projektowania i wykonania urządzenia PAAF drugiej generacji*, „Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów”, 4(95), 2013, 11–20.
2. Brol S., *Progress in Application of Portable Accelerometer Based Measurement Systems in Powertrain Performance Testing Performed on Road*, „SAE Technical Paper. SAE 2013 World Congress & Exhibition”, 2013, DOI: 10.4271/2013-01-1433.
3. Szegda A., Navarro E., Brol S., *Analysis of methods of wheel speed measurement using magnetic sensor mounted in vehicle*, „Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów”, 4(107), 2016, 91–98.
4. Szegda A., Brol S., *Detection of pneumatic wheel speed based on type magnetic field*, „Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów”, 2016, 91–97.
5. [http://www.oponeo.pl/artukul/budowa-opon-funkcje-poszczegolnych-elementow] Oponeo: *Budowa opon – funkcje poszczegolnych elementow 12.12.2016*.
6. Milham S., Hatfield J.B., Tell R., *Magnetic Fields From Steel-Belted RadialTires: Implications for Epidemiologic Studies*, „Bioelectromagnetics”, Vol. 20, 1999, 440–445.
7. LeGoff A., Lacoume J.-L., Blanpain R., Dauve S., Serviere C., *Automobile wheel clearance estimation using magnetism*, „Mechanical Systems and Signal Processing”, Vol. 26, 2012, 315–319.
8. Mitschke M., *Dynamika samochodu. T. 2, Drgania*, WKiŁ, Warszawa 1989.
9. Lanzendoerfer J., Szczepaniak C., Szosland A., *Teoria ruchu samochodu*, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 1988.
10. Brol S., *Analiza możliwości wykorzystania bezpośredniego pomiaru przyspieszenia do wyznaczania właściwości trakcyjnych samochodu osobowego*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole 2013.
11. Brol S., Prażnowski K., Augustynowicz A., *Sposób pomiaru prędkości obrotowej koła ogumionego pojazdu drogowego i układ do pomiaru prędkości obrotowej koła ogumionego pojazdu drogowego*, MKP, Politechnika Opolska. Patent, Polska, nr PL 223767, 2014.
12. Kawase M., Tazaki S., *Method for detecting the magnetic field of a tire*, US 6404182 B1.
13. Kawase M., Tazaki S., Kaneko H., Sato H., Urayama N., *Method and apparatus for detecting tire revolution using magnetic field*, US 6246226 B1.
14. [https://www.pintere-st.com/johntwmcgee/drones] Robots 10.12.2016.
15. Chmielewski A., Radkowski S., Szulim P., *Badania czujnika Flux-Gate*, „Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów”, 5(96), 2013, 119–130.

Prototype of device to measure changes of induction generated by spinning car's wheels

Abstract: The article presents the prototype device for the measurement of induction change generated by a spinning tyre. We discuss the concept of a kinematic design mechanical properties, and the measuring and control system, which is based on two cooperating each other 8-bit microcontrollers. Three main modes of operation of the measurement system were described. Finally changes of magnetic induction in the geomagnetic field caused by rotating wheels of the car measured in the radial direction to the vertical axis of rotation were shown.

Keywords: magnetic induction, measuring device, measurement system, car's wheel

dr hab. inż. Sebastian Brol, prof. PO

s.brol@po.opole.pl

Pracuje w Katedrze Pojazdów Drogowych i Rolniczych na Wydziale Mechanicznym Politechniki Opolskiej. Zajmuje się testowaniem samochodów, budową urządzeń pomiarowych i diagnostyką zespołów pojazdów samochodowych.



mgr inż. Agnieszka Szegda

agnieszka.szegda@gmail.com

Doktorantka w Katedrze Pojazdów Drogowych i Rolniczych na Wydziale Mechanicznym Politechniki Opolskiej. Zajmuje się modelowaniem i identyfikacją zespołów pojazdów samochodowych.

