

INNOWACYJNA METODA EKSPERYMENTALNEJ IDENTYFIKACJI DEFORMACJI OPON POJAZDÓW

CZĘŚĆ 1: SYSTEMATYKA ZNANYCH METOD POMIARU DEFORMACJI OPON

JAKUB CHOŁODOWSKI¹, PIOTR DUDZIŃSKI²

Politechnika Wroclawska

Streszczenie

Niedoskonałość modeli teoretycznych ogumienia i istotny wpływ opon na bezpieczeństwo ruchu pojazdów sprawiają, iż problem pomiaru deformacji ogumienia w interakcji z nawierzchnią jest aktualny. Przedstawiony w niniejszym artykule przegląd stanu techniki w dziedzinie przetworników i metod pomiaru deformacji wskazuje na bogactwo i różnorodność dostępnych rozwiązań. Mimo to, na podstawie przyjętej systematyki podziału wykazano, iż przetworniki każdej z grup charakteryzują odrębne, niejednokrotnie trudne do pogodzenia właściwości. Brak przetwornika pozbawionego niedogodności skłania do podjęcia próby agregacji wybranych korzystnych cech rozwiązań znanych ze stanu techniki stanowiących bazę do opracowania innowacyjnego przetwornika deformacji nowej generacji, który zostanie zaprezentowany w następnym artykule.

Słowa kluczowe: przetworniki deformacji ogumienia, pomiar składowych deformacji ogumienia, stan techniki

1. Wstęp

Czynniki motywujące podjęcie badań składowych deformacji opon wytyczają dwa główne kierunki badawcze determinujące rozwój przetworników deformacji ogumienia. Kierunek pierwszy zmierza do opracowania zdolnych do samodiagnostyki oraz współpracy z układami kontroli trakcji nowej generacji tzw. opon inteligentnych, których zastosowanie w pojazdach wpłynąć może na poprawę bezpieczeństwa w ruchu

¹ Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczny, Katedra Inżynierii Maszyn Roboczych i Pojazdów Przemysłowych, bud. B-5 ul. Łukasiewicza 7/9, 50-370 Wrocław, e- mail: jakub.cholodowski@pwr.edu.pl, tel. 500 22 11 96

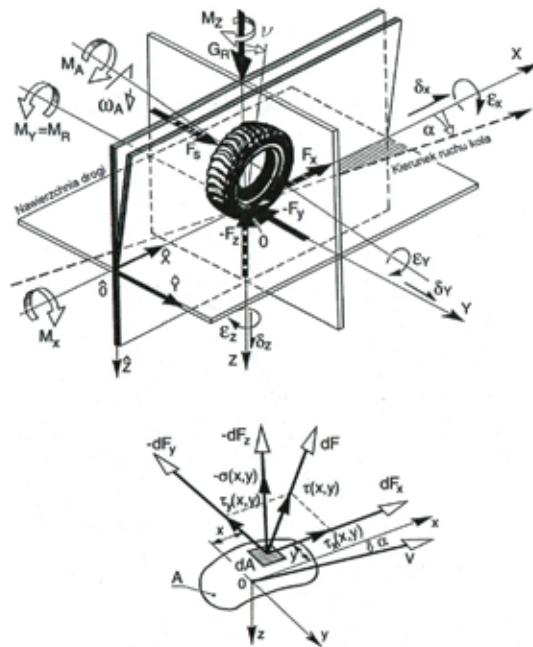
² Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczny, Katedra Inżynierii Maszyn Roboczych i Pojazdów Przemysłowych, bud. B-5 ul. Łukasiewicza 7/9, 50-370 Wrocław, e- mail: piotr.dudzinski@pwr.edu.pl, tel. 71 321 53 96

drogowym [18, 21, 24]. Zadaniem drugiego z kierunków jest ilościowy opis parametrów mechanicznych opon, które dobrze reprezentują sztywności opon. Sztywności główne można zdefiniować zależnościami (1 – 6) (rys. 1.):

- sztywność promieniowa
$$c_z = \frac{\partial |F_z|}{\partial z}, \quad (1)$$

- sztywność boczna
$$c_y = \frac{\partial |F_y|}{\partial y}, \quad (2)$$

- sztywność styczna
$$c_x = \frac{\partial F_x}{\partial x}, \quad (3)$$



Rys. 1. Ilustracja deformacji opony i sił działających na oponę w procesie jej interakcji z nawierzchnią drogi [7]

- sztywność obwodowa
$$c_{M_A} = \frac{\partial M_A}{\partial \varepsilon_y}, \quad (4)$$

- sztywność skrętna
$$c_{M_z} = \frac{\partial M_z}{\partial \varepsilon_z}, \quad (5)$$

- sztywność na pochylanie koła
$$c_{M_x} = \frac{\partial M_x}{\partial \varepsilon_x}, \quad (6)$$

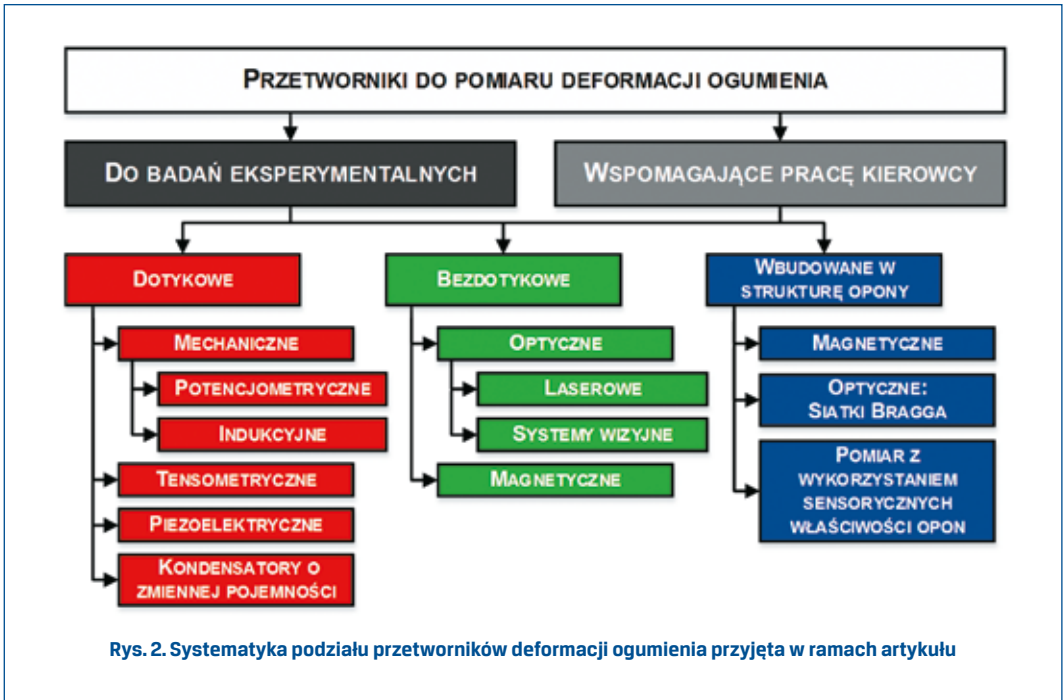
W ujęciu globalnym sztywności opon, szczególnie sztywność promieniowa, boczna i styczna, stanowią ważne dane wejściowe w modelowaniu zarówno zagadnień statycznych jak i dynamicznych pojazdów, np. energochłonności ruchu, drgań nadwozia, np. tzw. zjawiska galopowania pojazdów przemysłowych [17]. Równie istotną rolę w skutecznym przewidywaniu zachowania maszyn pełnią modele teoretyczne ogumienia przyjmowane w obliczeniach analitycznych bądź implementowane w oprogramowaniu symulacyjnym. W literaturze przedmiotu wykazano z kolei istnienie przypadków obciążenia koła jezdne- go, w których klasyczne modele obliczeniowe opon nie sprawdzają się. Za przykład podać można zagadnienie proces rozruchu koła jezdne- go [1]. Badania doświadczalne stanowią najdokładniejszą z metod wyznaczania parametrów mechanicznych opon i w sposób nie- kwestionowany przyczyniać się mogą do rozwoju istniejących lub formułowania nowych modeli ogumienia.

W modelowaniu interakcji opon z podłożem „sztywnym” czy też odkształcalnym niezbęd- na jest znajomość równoczesnej deformacji opony w trzech głównych kierunkach. Według wiedzy autorów szereg metod pomiaru deformacji opon znajduje się w fazie koncepcji bądź rozwiązań prototypowych, a brak jest dokładnej i uzasadnionej ekonomicznie metody re- alizującej powyższe zadanie. Wychodząc naprzeciw potrzebom praktyki inżynierskiej, po systematycznej analizie stanu wiedzy i techniki, zaprezentowanej w ramach niniejszego artykułu, podjęto próbę opracowania innowacyjnej metody badań laboratoryjnych trzech składowych deformacji opony w procesie jej współpracy z dowolnym podłożem.

2. Stan techniki

Waga zagadnienia pomiaru deformacji ogumienia oraz wspomniana rozbieżność kierun- ków badawczych determinujących rozwój przetworników deformacji sprawia, iż na prze- strzeni lat opracowano przetworniki deformacji opon, których różnorodność stanowi o du- żej liczebności kryteriów ich podziału. Systematykę podziału przyjętą w artykule ilustruje rys. 2.

Przetworniki z grupy dotykowych do przeprowadzenia pomiaru wymagają fizycznego kon- taktu elementu sensorycznego z powierzchnią opony badanej. Przetworniki bezdotyko- we stanowią pod tym względem ich przeciwieństwo. Obecność przetworników ww. grup w obrębie opony jest łatwo zauważalna, choć może wymagać demontażu opony z obrę- czy. Przetworniki wbudowane, podobnie jak dotykowe, wymagają kontaktu elementów czujnikowych z ogumieniem. Ich obecność jest jednak niemożliwa do wykrycia bez naru- szenia struktury opony, w której wnętrzu są zintegrowane. W ramach omówionych grup jako dodatkowe kryterium podziału przyjęto zjawisko fizyczne, na którym opiera się pomiar deformacji, zaś kryterium nadrzędne stanowi zastosowanie urządzenia pomiarowego.



Przetworniki do badań eksperymentalnych, przeznaczone m.in. do wyznaczania sztywności i współczynników tłumienia ogumienia, charakteryzują się przede wszystkim dużą dokładnością pomiaru. Budowane są przy wykorzystaniu elementów sensorycznych o monotonicznej, ściśle znanej i powtarzalnej charakterystyce. Dąży się ponadto do minimalizacji ich wpływu na sposób odkształcania opony badanej. W grupie tej preferuje się przetworniki umożliwiające bezpośredni pomiar deformacji. W przypadku urządzeń realizujących pomiar metodą pośrednią, zależność wiążąca dane pomiarowe ze składowymi deformacji opony powinna być nieskomplikowana. Ze względu na charakter badań laboratoryjnych, prowadzonych najczęściej na dedykowanych stanowiskach doświadczalnych, dopuszcza się rozmieszczenie elementów układu pomiarowego poza obrębem koła badanego. Pomiar deformacji z zewnątrz koła zawęża jednak horyzont badań deformacji ogumienia do przypadku współpracy opony z podłożem sztywnym. Wprowadzając układ pomiarowy do wnętrza koła, zakres modyfikacji obręczy oraz parametry konstrukcji przetwornika typu laboratoryjnego nie zawsze uwzględniają konieczność wyważenia koła jezdnego. Nośność obręczy i możliwość jej zamocowania do konstrukcji stanowiska musi być jednak zachowana. Konieczność montażu koła w pojeździe występuje jedynie w przypadku testów drogowych, które należą do nielicznych [10, 25]. Niezawodność przetworników do badań eksperymentalnych mierzona jest ich odpornością na zakłócenia występujące w środowisku laboratorium, których ekranowanie nie sprawia problemów. Okres pomiędzy kolejnymi zabiegami konserwacyjnymi przetworników laboratoryjnych z punktu widzenia wygody użytkownika powinien być możliwie długi, jednak akceptowalnym jest nawet okres pojedynczej sesji pomiarowej.

Przetworniki deformacji ogumienia wspomagające pracę kierowcy służą do permanentnego stosowania w pojazdach. Stanowią one elementy składowe nowej generacji układów bezpieczeństwa pojazdów. Czynniki te stawiają przed nimi odmienne wymagania względem wyspecyfikowanych powyżej. Jeżeli przetwornik ma być dla kierowcy źródłem informacji o przybliżonym stanie nawierzchni, który ilościowo opisać można wartością współczynnika przyczepności, wystarczającym jest zgrubne oszacowanie skali deformacji. Interesującą jest wówczas wartość progowa sygnału pomiarowego, przy której współczynnik przyczepności zauważalnie spada, np. wskutek lokalnego oblodzenia nawierzchni. Znajomość dokładnej charakterystyki elementu sensorycznego jest istotna, jeśli przetwornik deformacji jest składową systemy bezpieczeństwa funkcjonującego niezależnie od kierowcy, jak ABS czy ESP. Klasa przetwornika może być jednak niższa w odniesieniu do urządzeń wykorzystywanych w badaniach eksperymentalnych. Z punktu widzenia metody pomiaru, złożoność algorytmu estymacji składowych deformacji na podstawie sygnału pomiarowego umożliwiać powinna pracę układu bezpieczeństwa sprzężonego z przetwornikiem w czasie rzeczywistym. W przypadku omawianej grupy na znaczeniu przybiera kwestia niezawodności urządzenia pomiarowego pracującego w typowych warunkach eksploatacji koła jezdnego. Czas nieprzerwanej pracy przetwornika powinien być co najmniej równy okresowi pomiędzy kolejnymi wymianami opon czy to w związku ze zmianą pór roku, czy, jak w przypadku przetworników wbudowanych, z całkowitym zużyciem ogumienia. Konstrukcja przetwornika i zakres modyfikacji obręczy koła nie mogą wpływać na wyważenie koła jezdnego. Bezwzględnie pozwalać muszą na montaż koła do elementów ustroju zawieszenia pojazdu. Uwzględniony powinien zostać również problem występowania po sobie kolejnych cykli obciążania i relaksacji monitorowanej sekcji opony. Liczbę cykli w normalnych warunkach użytkowania opon szacuje się na kilka milionów [18]. W szczególności w przypadku przetworników dotykowych ważna jest pewność ich mocowania do powierzchni opony, co uzyskać można m.in. przez dopasowanie ich modułu sprężystości do modułu sprężystości mieszanki gumowej. Wśród innych czynników, na które przetwornik wspomagający pracę kierowcy powinien być obojętny należą m.in.: zakłócenia elektromagnetyczne mające swoje źródło zarówno w podzespołach pojazdu jak i pochodzące z jego otoczenia, udary mechaniczne, wahania temperatury mieszczące się w granicach $-30^{\circ}\text{C} \div 70^{\circ}\text{C}$, zabrudzenia, działanie wody i innych substancji chemicznych jak oleje czy paliwo.

Dotykowe przetworniki deformacji ogumienia

Składową deformacji opony budzącą znaczne zainteresowanie badaczy jest jej ugięcie promieniowe. Intuicyjnym rozwiązaniem problemu jego pomiaru jest zastosowanie potencjometrycznego lub indukcyjnego, liniowego przetwornika położenia umieszczonego wewnątrz koła, którego obudowa pozostaje nieruchoma względem obręczy, zaś końcówka trzpienia pomiarowego spoczywa w wybranym punkcie dna opony. Metoda ta znana jest w praktyce badań laboratoryjnych opon pojazdów samochodowych i przemysłowych obciążanych w warunkach statycznych [2]. Wadę rozwiązania stanowi jednak fakt, iż punkt podparcia końcówki trzpienia zmienia się w chwili zaistnienia składowej stycznej lub poprzecznej deformacji opony. Jeśli składowe te nie podlegają pomiarowi, w okoliczności ich

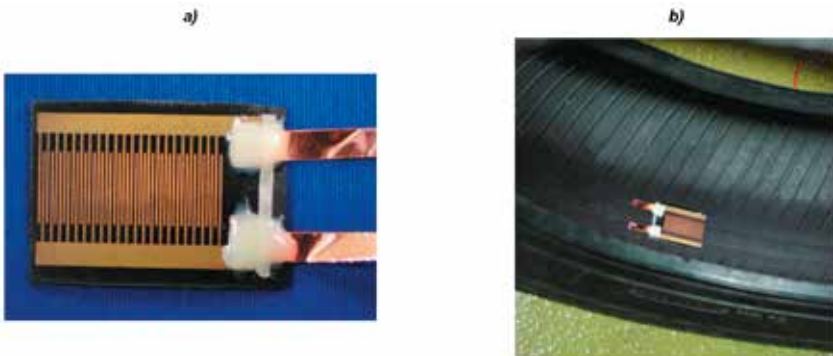
wystąpienia punkt powierzchni opony, którego przemieszczenie promieniowe jest mierzone, staje się niezdefiniowany.

Tensometry rezystancyjne w pomiarach obwodowego odkształcenia pasa opony stosuje się wyłącznie w roli czujników referencyjnych podczas badania charakterystyk prototypowych przetworników dedykowanych do pomiaru deformacji opon [18, 21, 22]. Ich nieprzydatność w roli niezależnych czujników deformacji ogumienia wynika z różnicy pomiędzy modułami sprężystości stopów oporowych i materiałów elastomerowych. Jest ona na tyle znacząca, iż w pobliżu punktu pomiarowego zakłócony zostaje naturalny sposób deformacji elastomeru. Interesująca z punktu widzenia badacza ilościowa ocena deformacji opony jest więc niemożliwa. Różnica ta nie sprzyja również długotrwałej pracy czujnika w typowych, omówionych wyżej warunkach eksploatacji koła jezdnego.

W poszukiwaniu czujników o podobnej do tensometrów zasadzie działania, wykonanych z materiału o module sprężystości dopasowanym do modułu sprężystości elastomeru, przeznaczonych więc do permanentnego stosowania w pojazdach samochodowych w typowych warunkach ich eksploatacji, rozwinięto ideę tensometrycznego czujnika pojemnościowego [14, 18, 21]. Istotną zaletą kondensatorów o zmiennej pojemności jest możliwość budowy na ich bazie przetworników pasywnych, co realizuje się przez włączenie elementu sensorycznego w obwód RC lub RLC wyposażony w antenę odbiorczą i nadawczą. Otrzymuje się w ten sposób filtr fal radiowych wzmacniający w widmie sygnału stymulującego przetwornik częstotliwość rezonansową obwodu zależną od odkształcenia opony [20, 19, 22].

Jednym z doskonalszych sensorów omawianego typu jest kondensator grzebieniowy o cienkowarstwowych elektrodach wytworzonych na powierzchni elastomerowego podłoża (rys. 3a.) przeznaczony do montażu na powierzchni wewnętrznej opony (rys. 3b.). Odkształcanie ogumienia w rejonie punktu mocowania kondensatora skutkuje deformacją i względnym ruchem jego elektrod przekładającym się na zmianę pojemności. Liniowa zależność pojemności od deformacji pozostaje zachowana na przestrzeni ponad miliona cykli obciążania i relaksacji. Podstawowym zastosowaniem kondensatora w konfiguracji przedstawionej na rys. 3b. jest pomiar chwilowego obwodowego odkształcenia pasa opony w warunkach ich eksploatacji [18]. Może on doraźnie zastępować czujniki prędkości obrotowej kół wykorzystywane przez współczesne systemy ABS. Przy danej sztywności pasa opony na rozciąganie, sygnał pochodzący z czujnika reprezentuje natomiast wartość siły trakcyjnej stanowiącej daną wejściową algorytmu sterowania systemów ABS kolejnej generacji [21].

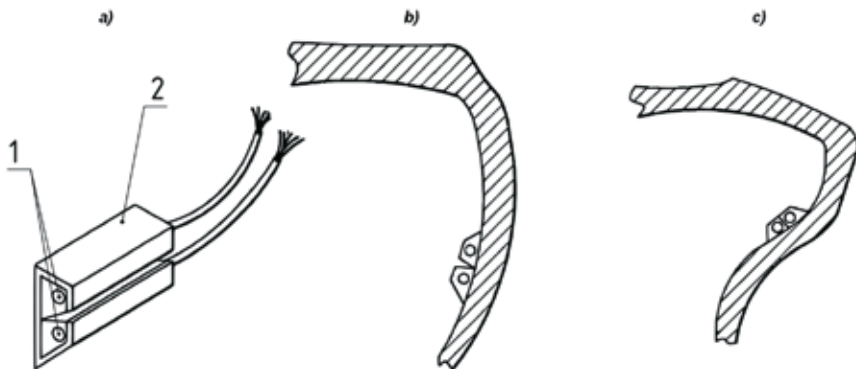
W konfiguracji tej monitorować można ponadto bieżącą wartość ugięcia promieniowego poszczególnych opon pojazdu i długość strefy ich styku z podłożem. Dane te uważa się za szczególnie istotne z punktu widzenia zachowania optymalnej wartości powierzchni styku opon pojazdów ciężarowych z nawierzchnią niezależnie od masy transportowanego ładunku [11]. Pomiar wymienionych wielkości wymaga identyfikacji w sygnale pomiarowym chwil wejścia i wyjścia kondensatora ze strefy styku koła z nawierzchnią i przebiega na podstawie proporcji czasu spędzonego przezeń w obydwu strefach. Podobną metodę proponuje się stosować w pomiarach ugięcia promieniowego opon z użyciem czujników piezoelektrycznych [11]. Innym sposobem pomiaru składowej promieniowej deformacji jest montaż kondensatora o omawianej konstrukcji na powierzchni ścianki bocznej opony



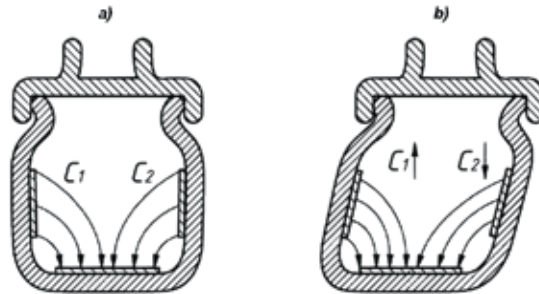
Rys. 3. Czujnik deformacji ogumienia o zmiennej pojemności; a - kondensator grzebieniowy o elektrodach wytworzonych na powierzchni elastomerowego podłoża metodą fotolitografii w warstwie złota o grubości 150 nm, b - czujnik zamontowany wewnątrz opony w celu badania deformacji [18]

w ten sposób, aby ugięcie ścianki skutkowało zginaniem czujnika w osi równoległej do palców elektrod [14].

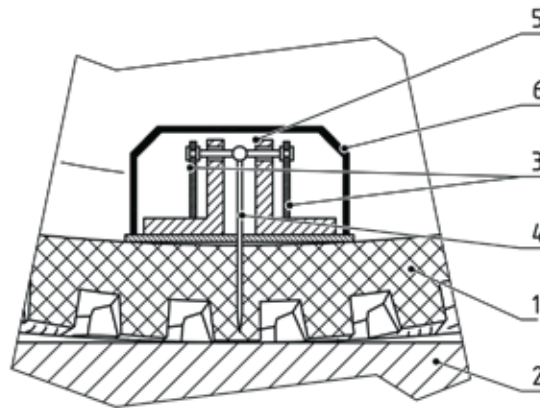
Analogię wobec ostatniego rozwiązania stanowi koncepcja czujnika instalowanego wewnątrz opony, w sposób przedstawiony na rys. 4. W jego przypadku ugięcie ścianki opony powoduje zginanie podatnej obudowy czujnika wzdłuż V-kształtnego rowka, co prowadzi do zmiany odległości dzielącej parę walcowych elektrod [6]. Znana jest ponadto idea czujnika w postaci pary kondensatorów (C1, C2, rys. 5.), których elektrody rozmieszczone są we wnętrzu opony w ten sposób, iż w warunkach deformacji poprzecznej pojemność jednego z kondensatorów rośnie, zaś drugiego odpowiednio maleje [14]. Obydwa wspomniane rozwiązania, opracowane z myślą o bieżącej diagnostyce opon w warunkach eksploatacji pojazdów, wg wiedzy autorów nie znalazły szerszego zastosowania.



Rys. 4. a - kondensator o zmiennej pojemności jako czujnik do pomiaru składowej promieniowej deformacji ogumienia; b,c - element sensoryczny zainstalowany na wewnętrznej powierzchni ścianki opony; 1 - elektroda, 2 - obudowa czujnika z V-kształtnym rowkiem; b - w stanie nieodkształconym, c - w warunkach deformacji ogumienia [6]

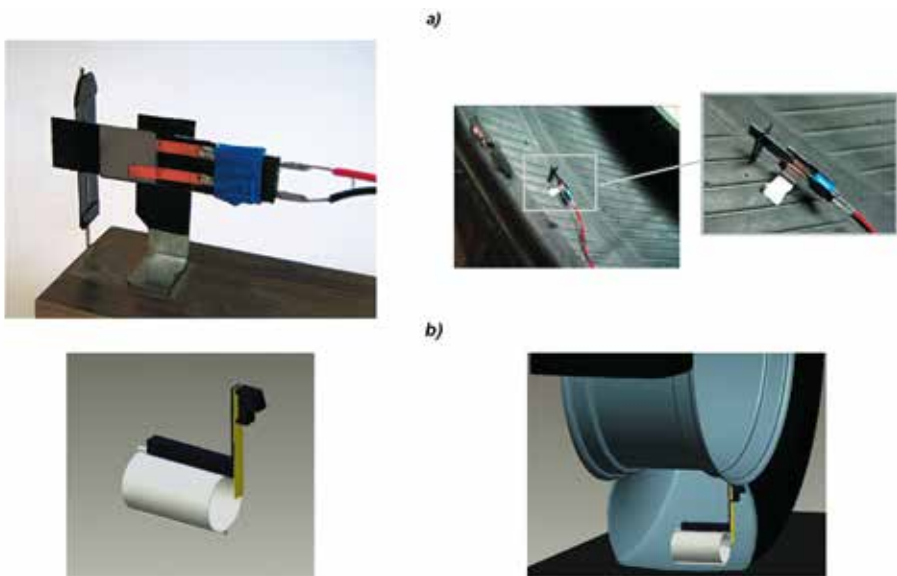


Rys. 5. Kondensator płytowy o zmiennej pojemności do pomiaru składowej deformacji poprzecznej ogumienia zainstalowany we wnętrzu opony; a - w stanie nieodkształconym $C_1 = C_2$, b - w warunkach deformacji ogumienia $C_1 > C_2$ [14]



Rys. 6. Przekrój piezoelektrycznego czujnika do pomiaru ugięcia klocków bieżnika, wykorzystującego zjawisko powierzchniowej fali akustycznej (SAW); 1 - opona, 2 - nawierzchnia drogi, 3 - czujnik SAW, 4 - igła, 5 - zabezpieczenie przeciw przeciążeniowe, 6 - obudowa [23]

Przykładem przetwornika pasywnego, zaliczanego do grupy piezoelektrycznych, jest przetwornik do pomiaru ugięcia klocków bieżnika (rys. 6.). Posiada on igłę, która wbita od wewnątrz opony, penetruje klocek. Wystający ponad powierzchnię opony wolny koniec igły naśladujący na zasadzie dźwigni ruchu klocka połączony jest z piezoelektrycznymi elementami sensorycznymi, których działanie bazuje na zjawisku propagacji fali akustycznej po powierzchni piezoelektrycznego podłoża (SAW – ang. *Surface Acoustic Wave*). Sensory SAW pobudzane są falą radiową, której parametry, m.in. częstotliwość i fazę, modyfikują w stopniu korespondującym ze stopniem ugięcia klocka bieżnika. Przetwornik przeznaczony jest do permanentnego stosowania w pojazdach samochodowych w celu szacowania bieżącej wartości siły trakcyjnej. Wg wiedzy autorów pomyślnie przeszedł on wstępne próby weryfikujące jego przydatność w tym zastosowaniu [23].



Rys. 7. Przykłady piezoelektrycznych przetworników do pomiaru składowej poprzecznej deformacji ogumienia konstrukcyjnie wykorzystujących podatną belkę pokrytą folią PVDF [10]

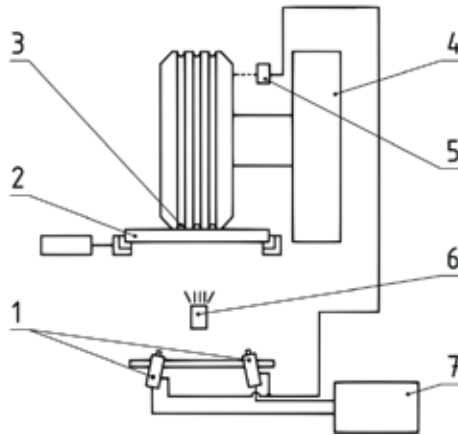
W grupie przetworników piezoelektrycznych plasują się również paski folii polichlorku winylidenu (PVDF) naklejane na powierzchnię zewnętrzną lub wewnętrzną opon. W praktyce laboratoryjnej wykorzystano je w pomiarach doświadczalnych ugięcia promienowego karkasu i obwodowej składowej deformacji pasa opony lekkiego robota mobilnego w procesie jej interakcji z podłożem sztywnym w trakcie jazdy [26]. Folię PVDF wykorzystano również do budowy prototypowych przetworników składowej poprzecznej deformacji ogumienia, których kluczowy element stanowi podatna belka (rys. 7.). Sposób podparcia końców belki we wnętrzu opony zależy od wariantu przetwornika (porównaj rys. 7a., 7b.). W każdym z nich dobrany jest jednak tak, aby napięcie generowane na powierzchniach folii PVDF pokrywającej belkę reprezentowało wartość chwilowego przyrostu składowej poprzecznej deformacji opony. Przetworniki te znalazły zastosowanie w dynamicznych badaniach laboratoryjnych zmierzających do weryfikacji nowatorskiego algorytmu szacowania współczynnika przyczepności [10].

Bezdotykowe przetworniki deformacji ogumienia

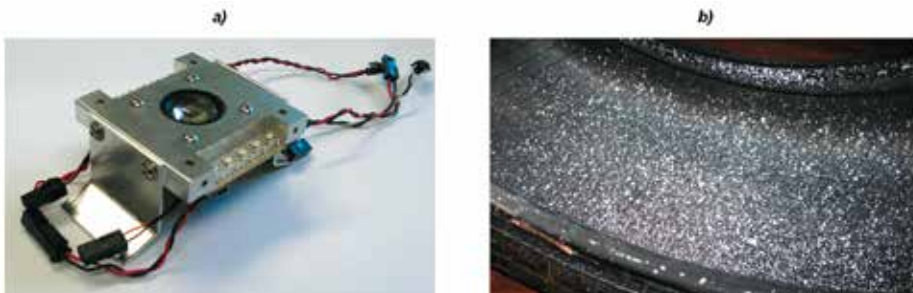
Wśród przetworników bezdotykowych najczęściej spotyka się układy kamer optycznych.

Jeden z bardziej rozbudowanych stanowi stanowisko do laboratoryjnych pomiarów deformacji bieżnika metodą stereowizyjną (rys. 8.), stanowiącą alternatywę wobec innych sposobów pomiaru deformacji bieżnika użytecznych w procesie projektowania opon.

Pomiar prowadzony może być w warunkach statycznych lub powolnego przetaczania koła jezdneho po podłożu sztywnym. Na stanowisku koło jezdne dociskane do powierzchni przezroczystej bieźni obserwowane jest przez parę kamer synchronicznie rejestrujących po jednym zdjęciu zdeformowanego bieźnika widocznego w dwóch różnych ujęciach. Współrzędne pojedynczego punktu bieźnika w przestrzeni trójwymiarowej obliczane są na podstawie jego współrzędnych na każdym ze zdjęć, rozmieszczenia kamer na stanowisku oraz danych kalibracyjnych. Wyznaczenie trójwymiarowych współrzędnych punktów opony widocznych na obydwu zdjęciach z pary prowadzi do rekonstrukcji topografii powierzchni bieźnika [15].



Rys. 8. Stanowisko do stereowizyjnego pomiaru wymiarów geometrycznych oraz deformacji bieźnika;
 1 - kamera, 2 - przezroczysta bieźnia, 3 - rowki bieźnika odkształcanego w kontakcie z bieźnią,
 4 - manipulator obciążający koło, 5 - wyzwalacz synchronizujący pracę kamer, 6 - oświetlacz,
 7 - jednostka obliczeniowa [15]



Rys. 9. Kamera przystosowana do montażu we wnętrzu koła przeznaczona do pomiarów deformacji ogumienia (a) pokrytego losowym wzorem (b) [13]

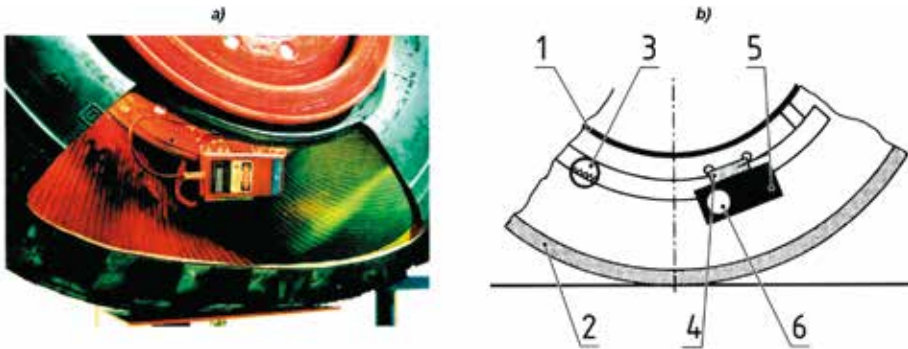
Redukcja liczby kamer do jednej oraz indywidualizacja jej budowy (rys. 9a.) pozwala na analizę przemieszczeń w trzech kierunkach oraz obrotów powierzchni opony względem obręczy z wnętrza koła [13, 16]. Dane w obliczeniach poszczególnych składowych deformacji stanowią wykonywane z dużą częstotliwością zdjęcia wewnętrznej powierzchni opony pokrytej wzorem (rys. 9.). Wartość składowych stycznej i poprzecznej deformacji opony szacuje się z użyciem algorytmu śledzącego ruch wzoru odniesienia w płaszczyźnie prostopadłej do osi optycznej soczewki. Składową promieniową reprezentuje pozorna zmiana wielkości elementów wzoru na rejestrowanym obrazie oraz stopień utraty jego ostrości.

Docelowo omówione rozwiązanie planuje się wykorzystywać do bieżącej analizy procesu interakcji koła samochodowego z nawierzchnią w celu poprawy skuteczności systemów stabilizacji toru jazdy. Wg wiedzy autorów w chwili obecnej znajduje się ono w fazie prototypu. Wstępna walidacja metody pomiaru przeprowadzona została jedynie w warunkach statycznego obciążenia koła, przy pomocy konwencjonalnej maszyny wytrzymałościowej. W jej trakcie ujawniono błąd metody wynikający z niedoskonałości wykonania soczewek zastosowanych w układzie optycznym kamery (rys. 9a.). Eliminacja imperfekcji soczewek w praktyce jest niewykonalna, zaś brak kompensacji ich wpływu uniemożliwia szacowanie składowej promieniowej deformacji ogumienia. W efekcie algorytm obliczania składowych deformacji zaproponowany w ramach omawianej metody charakteryzuje wysoki poziom komplikacji i duża złożoność obliczeniowa. Nie koresponduje to z ideą pracy systemu kontroli trakcji w czasie rzeczywistym. Na obecnym etapie rozwoju dążenie do uproszczenia budowy i miniaturyzacji kamery przy zachowaniu optymalnego poziomu ostrości rejestrowanego obrazu wymaga ponadto doboru parametrów geometrycznych układu optycznego do wymiarów badanego ogumienia [13]. Póki co metodę pomiaru angażującą kamerę jak i sam przetwornik lokować należy zatem w grupie rozwiązań przeznaczonych do badań eksperymentalnych.

Energochłonność kamer dodatkowo utrudnia prowadzenie z ich pomocą pomiarów zdalnych, a co za tym idzie prób zakładających ruch koła z wysokimi prędkościami. Bardziej energooszczędny przetwornik optyczny, teoretycznie jednak użyteczny w jednoczesnym pomiarze składowych deformacji opony w kierunkach stycznym, poprzecznym i promieniowym, konstrukcyjnie zbliżony jest do kamery, przy czym konwencjonalna matryca CCD lub CMOS zastąpiona została analogowym czujnikiem pozycji w postaci monolitycznej, światłoczułej płytki półprzewodnikowej, reagującej na zmianę położenia punktowego źródła światła. Pomiar składowych deformacji opony odbywa się przez śledzenie przy pomocy przetwornika ruchu diody LED zamocowanej w wybranym punkcie powierzchni dna opony [25]. Wg wiedzy autorów jest to jedyne spośród przedstawionych rozwiązań bezdotykowych, które z powodzeniem stosowano do badań eksperymentalnych w warunkach drogowych. W ich toku pomiar składowej deformacji opony w kierunku promieniowym, o ile teoretycznie wykonalny, okazał się niemożliwy ze względu na problem ze stabilizacją natężenia światła zastosowanej diody. Niedogodność ta nie przeszkodziła jednak w szacowaniu siły trakcyjnej w styku koła z nawierzchnią oraz badaniach opon w stanie aquaplaningu [25].

W grupie przetworników bezdotykowych znane jest ponadto zastosowanie triangulacyjnych głowic laserowych do badania promieniowej składowej deformacji ogumienia

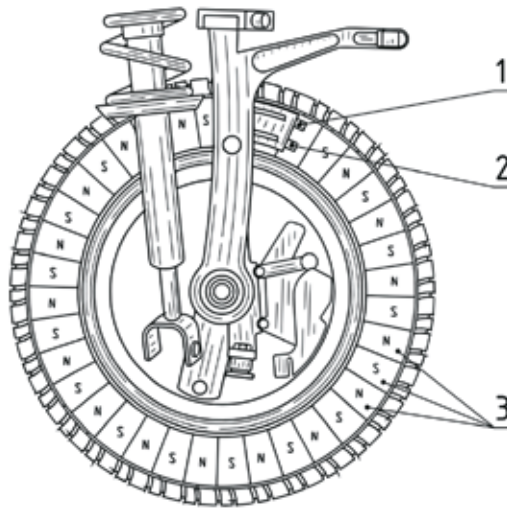
kół pojazdów wojskowych współpracujących z podatnym gruntem (rys. 10a.). Pomiar z ich użyciem prowadzi się na stanowisku doświadczalnym w warunkach statycznego obciążenia koła. Odległość dzieląca powierzchnię obręczy i dno opony mierzona jest we współrzędnych poprzecznej i obwodowej koła. Nieruchoma względem obręczy głowica laserowa mierzy odległość dzielącą obręcz i punkty powierzchni dna opony leżące w linii skierowanej poprzecznie względem koła. Skanowanie kolejnych linii we współrzędnej obwodowej opony odbywa się przez przemieszczanie głowicy na wózku napędzanym silnikiem krokowym, wzdłuż zębatej szyny o krzywiźnie odpowiadającej krzywiźnie obręczy koła, w zakresie kątowym $\pm 30^\circ$ względem środka powierzchni styku koła z nawierzchnią (rys. 10b.). W efekcie możliwym staje się określenie zarówno zarysu wybranego przekroju wzdłużnego opony jak i kształtu powierzchni styku koła z nawierzchnią [2]. Rozwiązanie z powodzeniem wprowadzono na rynek i jest oferowane komercyjnie [28].



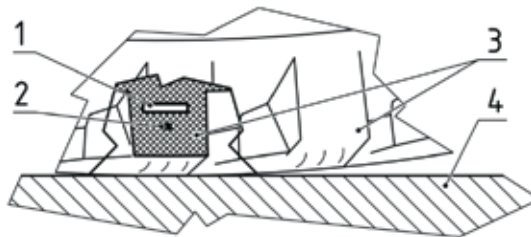
Rys. 10. Głowica laserowa przystosowana do pomiaru składowej promieniowej deformacji opony; a – głowica laserowa zainstalowana wewnątrz opony, b – schemat układu pomiarowego: 1 – opona, 2 – opona, 3 – prowadnica zębata, 4 – wózek, 5 – głowica laserowa, 6 – silnik krokowy [2]

Przetworniki deformacji ogumienia wbudowane w strukturę opony

Rozwiązaniem sytuującym się na pograniczu grup przetworników bezdotykowych i wbudowanych jest układ wykorzystujący czujniki pola magnetycznego. Źródłem pola magnetycznego, na które reagują czujniki (magnetorezystory lub czujniki Halla) rozlokowane na elementach zawieszenia (1, 2, rys. 11.), jest zintegrowany we wnętrzu ścianki opony, odkształcający się wraz z nią pas z naprzemiennie wytworzonymi różnoimiennymi biegunami magnetycznymi. Rozmieszczenie czujników względem opony sprawia, iż skalę składowej stycznej deformacji opony reprezentuje różnica faz sygnałów docierających z czujników, natomiast natężenie sygnału jest miarą składowej poprzecznej. Przedstawiony układ dedykowany jest do permanentnego stosowania w pojazdach samochodowych. Stanowi on część systemu zdolnego szacować wartości sił działających w styku poszczególnych kół z nawierzchnią drogi. W myśl autorów koncepcji stosowany może być jako substytut czujników akcelerometrycznych oraz prędkości obrotowej kół wykorzystywanych przez współczesne systemy bezpieczeństwa pojazdów samochodowych [12]. Autorzy artykułu nie odnotowali jednak wdrożenia patentu opisującego system.



Rys. 11. Układ wykorzystujący czujniki pola magnetycznego do pomiaru składowych stycznej i poprzecznej deformacji ogumienia; 1, 2 - czujniki pola magnetycznego, 3 - bieguny magnetyczne wytworzone w pasie ferromagnetycznym zintegrowanym we wnętrzu opony [12]



Rys. 12. Magnetyczny zintegrowany czujnik deformacji klocków bieżnika bazujący na matrycy czujników Halla - schemat układu pomiarowego; 1 - układ scalony z matrycą czujników Halla, 2 - magnes trwały, 3 - klocki bieżnika, 4 - nawierzchnia drogi [27]

Typowym reprezentantem grupy czujników wbudowanych w strukturę opony jest magnetyczny przetwornik do pomiaru deformacji klocków bieżnika. Wewnątrz układu scalonego, przeznaczonego do zabudowy wewnątrz elementu bieżnika w parze z niewielkich rozmiarów magnesem trwałym, zintegrowano matrycę czujników Halla rozmieszczonych na planie krzyża (rys. 12.). Położenie magnesu względem matrycy, a więc i poziom sygnałów poszczególnych czujników Halla zmienia się wskutek ściśnięcia i zginania podatnego klocka w strefie kontaktu koła z nawierzchnią. Zaprezentowane rozwiązanie jest drugim, po zilustrowanym rys. 6., dedykowanym do permanentnego stosowania w pojazdach samochodowych celem szacowania bieżącej wartości siły trakcyjnej na podstawie stopnia zdeformowania elementów bieżnika. Wg wiedzy autorów artykułu, w przeciwieństwie do

omówionego wcześniej, nie zostało ono jednak zweryfikowane w warunkach drogowych. Charakterystyki przetwarzania układu scalonego wyznaczano jedynie dla pary przetwornik – magnes trwały niezabudowanych wewnątrz elementu bieżnika [27].

Innym typem czujników zdalnych do integracji we wnętrzu struktury są światłowodowe siatki Bragga. Pojedynczy światłowód zintegrowany wewnątrz karkasu obwodowo względem pasa opony pozwala wyznaczyć kontur zniekształconej opony w wybranym przekroju wzdłużnym koła. Umieszczenie grupy światłowodów we wzajemnie równoległych płaszczyznach daje możliwość uzyskania obrazu powierzchni opony, w szczególności umożliwia szacowanie pola i kształtu powierzchni styku koła z nawierzchnią czy to w warunkach stanowiska laboratoryjnego, czy typowych warunkach drogowych. W dalszej kolejności przedstawiony układ do pomiaru deformacji posłużyć może do pośredniego pomiaru ciśnienia ogumienia, jako alternatywa wobec stosowanych obecnie w pojazdach samochodowych systemów kontroli ciśnienia ogumienia. Na tle innych dostępnych dotąd rozwiązań wyróżniającą cechą czujników światłowodowych, motywującą ich szersze stosowanie, jest fakt, iż pozwalają one dodatkowo na pomiar temperatury ogumienia [3].

Alternatywę wobec przytoczonych sposobów pomiaru deformacji opon stanowi metoda wykorzystująca sensoryczne właściwości opony, bez użycia dodatkowych elementów sensorycznych. Istotą zbliżona do omówionej wcześniej metody angażującej do pomiaru zmiennej pojemności kondensator grzebieniowy, polega na pomiarze pojemności kondensatora utworzonego z wzajemnie równoległych drutów opasania przedzielonych mieszanką gumową, połączonych w dwie grupy elektrodowe oraz rezystancji mieszanki zmieniających się w funkcji odkształcenia opony. Na obecnym etapie rozwoju jej zastosowanie wymaga naruszenia struktury opony (rys. 13.), zaś pojemność omówionego kondensatora jest na tyle mała, że pojemności pasożytnicze układu są źródłem zakłóceń sygnału pomiarowego na nieakceptowanym poziomie. W przedstawionej formie jej przydatność zarówno w badaniach laboratoryjnych jak i bieżącym monitoringu stanu ogumienia w warunkach drogowych jest więc mała [19].



Rys. 13. Opona przygotowana do pomiarów deformacji z wykorzystaniem właściwości sensorycznych jej struktury [19]

3. Podsumowanie

W ramach artykułu przedstawiono przegląd stanu techniki w dziedzinie przetworników deformacji opon pojazdów. Przetworniki każdej z omówionych grup (rys. 2.) charakteryzują się unikatowym zestawem, niejednokrotnie wykluczających się cech predysponujących je do różnorodnych zastosowań (tabela 1.).

Znane dotychczas przetworniki dotykowe nie pozwalają na prowadzenie jednoczesnego pomiaru więcej niż dwóch składowych deformacji ogumienia, przy czym brak jest możliwości pomiaru z ich pomocą składowej stycznej. Dokładność szacowania składowej promieniowej zależy natomiast od szczególności stanowiącego podstawę algorytmu szacowania modelu teoretycznego ogumienia wymagającego w wybranych przypadkach dostarczenia dodatkowych danych wejściowych, np. wartości ciśnienia panującego wewnątrz ogumienia [6]. Mimo to wyniki pomiarów metodami dotykowymi wydają się najbardziej wiarygodne ze względu na często nieskomplikowaną relację pomiędzy sygnałem pomiarowym a odkształceniem struktury opony. W skali przedstawionego przeglądu wyłączną zaletą czujników dotykowych wykorzystujących zjawisko propagacji powierzchniowej fali akustycznej (rys. 6.) i kondensatorów o zmiennej pojemności (rys. 3.), istotną z punktu widzenia rozwoju idei opon inteligentnych, jest możliwość budowy na ich bazie przetworników pasywnych. Do innych zalet większości omówionych przetworników dotykowych należą wymiary i masa niewpływające na wyważenie koła oraz łatwość montażu na powierzchni produkowanych nawet obecnie opon.

Przetworniki optyczne, najczęściej spotykane wśród przetworników bezdotykowych, pozwalają na kompleksowy i bezinwazyjny pomiar deformacji. Wyróżniającą ich zaletą jest potencjalnie duża liczba punktów pomiarowych, których przemieszczenie podlega rejestracji w pojedynczej sesji pomiarowej, tak iż teoretycznie wykonalnym jest odwzorowanie powierzchni zdeformowanego ogumienia. Algorytmy obliczeniowe stosowane w większości metod angażujących kamery charakteryzują się jednak wysokim poziomem komplikacji i dużą złożonością obliczeniową wynikającymi z konieczności kompensacji błędów spowodowanych imperfekcjami instrumentów optycznych. Nieuwzględnienie stosownych poprawek uniemożliwia natomiast szacowanie składowej promieniowej deformacji ogumienia. W efekcie sprzężenie kamery z systemem kontroli trakcji wymaga kompromisu pomiędzy wydajnością i dokładnością prowadzonych obliczeń deformacji. Pomimo braku fizycznego kontaktu pomiędzy oponą a obręczą koła elastyczność metod optycznych jest ograniczona z uwagi na ściśle dopasowanie parametrów geometrycznych układu optycznego kamery do wymiarów badanej opony. Kamery są ponadto przetwornikami o dużej energochłonności, co ogranicza możliwość prowadzenia z ich użyciem testów drogowych. Jedynym spośród przedstawionych rozwiązań bezdotykowych zweryfikowanym w warunkach drogowych jest układ śledzący ruch diody LED zamocowanej w wybranym punkcie dna opony, przy czym i w jego przypadku pomiar składowej deformacji opony w kierunku promieniowym okazał się niewykonalny. Wyróżniającą zaletą magnetycznej metody bezdotykowej jest brak konieczności odbioru sygnału z elementów obrotowych. Instalacja czujników do elementów zawieszenia sprawia jednak, iż podatność mechanizmu zawieszenia i jego elementów jest źródłem błęd pomiaru.

Tabela 1. Zestawienie elementów czujnikowych stanowiących stan techniki w dziedzinie pomiarów deformacji ogumienia wraz z oceną rozwiązań na obecnym etapie rozwoju; „-” – przetwornik nieprzydatny, „+” – przetwornik o małej przydatności, „++” – przetwornik o umiarkowanej przydatności, „+++” – przetwornik o dużej przydatności

Przetwornik			Wielkość mierzona							Stosowność				
Grupa	Podgrupa	Element czujnikowy	Deformacje karkasu					Deformacje bieżnika		Temperatura ogumienia	w pomiarach eksperymentalnych	we wspomaganlu pracy kierowcy		
			Składowa styczna deformacji	Składowa poprzeczna deformacji	Składowa promieniowa deformacji	Deformacja skrętna	Deformacja obwodowa pasa opony	Obwiednia i pole powierzchni styku z nawierzchnią	Zgięcie klocków				Ściskanie klocków	
Dotykowe	Tensometryczne	Tensometr oporowy					x					+	-	
		Mechaniczne	Potencjometr			x							++	-
	O zmiennej pojemności elektrycznej	Czujnik indukcyjny LVDT			x								++	-
		Kondensator grzeblinowy			x		x						++	+++
		Kondensator prętowy			x								+	+
		Kondensator płytowy		x									+	+
	Piezoelektryczne	Folia PVDF			x		x						+	+
		Bełka pokryta folią PVDF		x									++	+
		Czujnik SAW							x			++	+++	
Bezdotykowe	Optyczne	Matryca CCD - para kamer							x	x			+++	-
		Matryca CCD - jedna kamera	x	x	x	x							+++	+
		Monolityczna płytka światłoczuła	x	x	x								++	++
		Głowica laserowa			x				x				+++	-
	Magnetyczne	Para magnetorezystorów	x	x								+	++	
Wbudowane	Optyczne	Światłowodowa siatka Bragge			x			x			x		++	+++
	Magnetyczne	Matryca czujników Halla								x	x		++	++
	Pomiar bez czujnika	Elementy konstrukcyjne opony					x						+	-

Przetworniki wbudowane w strukturę opony stanowią grupę rozwiązań najmniej liczną, o wąskim spektrum zastosowań i ograniczonej wielozadaniowości. Ważną zaletą motywującą ich rozwój, otwierającą bowiem drogę do komercyjnego stosowania, jest jednak ich pomijalny wpływ na wyważenie koła i spodziewana duża odporność na oddziaływanie środowiska zewnętrznego. Unikatową własnością przetworników światłowodowych jest ponadto możliwość pomiaru temperatury ogumienia, której monitoring pozwala zapobiegać nagłemu pęknięciu opon wskutek przegrzania. Mimo widocznych zalet, integracja elementów czujnikowych wewnątrz struktury opon obecnie używanych wiąże się z naruszeniem ich struktury, zaś w przypadku opon nowych jest kosztowna zarówno ze względu na cenę samych elementów czujnikowych jak i komplikację procesu produkcji opon w nie wyposażonych. Część z metod, jak np. pomiar z wykorzystaniem sensorycznych właściwości opony, nie została jeszcze w pełni dopracowana.

Reasumując, znaczna liczba rozwiązań znanych ze stanu techniki w dziedzinie przetworników do pomiaru deformacji ogumienia znajduje się w fazie prototypu. Zauważalnym jest brak przetwornika o ugruntowanej pozycji, pozbawionego mankamentów. W szczególności brak jest urządzenia pozwalającego na kompleksowy pomiar deformacji, przez co rozumie się pomiar z separacją i rejestracją kilku składowych deformacji na raz, przy zachowaniu relatywnie małego stopnia komplikacji algorytmu obliczeniowego. Próbę połączenia tychże cech podjęto w autorskiej koncepcji mechanicznego przetwornika dotykowego przeznaczonego do badań doświadczalnych [8, 9], który zostanie zaprezentowany w drugiej części artykułu.

Literatura

- [1] Andrzejewski, R.: *Dynamika pneumatycznego kola jezdnego*. WNT. Warszawa 2010, ss. 129 – 143.
- [2] Aubel, T.: *Simulationsverfahren zur Untersuchung der Wechselwirkung zwischen Reifen und nachgiebiger Fahrbahn auf der Basis der Finite Elemente Methode*, rozprawa doktorska. Universität der Bundeswehr Hamburg, Institut für Kraftfahrwesen und Kolbenmaschinen. Hamburg 1994, ss. 135 – 140.
- [3] Bickel, B.: *Sensor apparatus for determination of the tire internal pressure for a motor vehicle*, patent: US 7,444,858. USA 2008.
- [4] Chołodowski, J.: *Opracowanie metody pomiaru deformacji opony w procesie jej interakcji z dowolnym podłożem, praca dyplomowa inżynierska*, promotor: prof. dr hab. inż. Piotr Dudziński, prof. zw. PWR. Politechnika Wrocławska. Wrocław 2013.
- [5] Chołodowski, J.: *Projekt przetwornika nowej generacji do pomiaru deformacji opony*, praca dyplomowa magisterska, promotor: prof. dr hab. inż. Piotr Dudziński, prof. zw. PWR. Politechnika Wrocławska. Wrocław 2014.
- [6] Demaie, H., Gougnaud, P., Lion, M. and Poulbot, V.: *A tire having a deformation sensor and method of evaluation of the deflection of a tire*, patent: US 7,493,807. USA 2009.
- [7] Dudziński, P.: *Lenksysteme für Nutzfahrzeuge*. Springer-Verlag. Berlin Heidelberg 2005.
- [8] Dudziński, P., Chołodowski, J.: *Czujnik do pomiaru przemieszczeń, zwłaszcza elementów ogumienia względem obręczy kola jezdnego*, zgłoszenie patentowe: P.409800. Warszawa 2014.
- [9] Dudziński, P., Chołodowski, J.: *Czujnik do pomiaru przemieszczeń, zwłaszcza elementów ogumienia względem obręczy kola jezdnego*, zgłoszenie patentowe: P.409801. Warszawa 2014.
- [10] Erdogan, G.: *New Sensors and Estimation Systems for the Measurement of Tire-Road Friction Coefficient and Tire Slip Variables*, rozprawa doktorska. The University of Minnesota. Minneapolis 2009.
- [11] Frey, N.W. and Albertson, R.J.: *Tire monitoring system and method*, patent: US 5,749,984. USA 1998.
- [12] Giustino, J.M.: *System and method for predicting tire forces using tire deformation sensors*, patent: US 6,550,320. USA 2003.
- [13] Green, R.W.: *A Non-contact Method for Sensing Tire Contact Patch Deformation Using a Monocular Vision System and Speckled Image Tracking*, praca dyplomowa magisterska. Auburn University. Auburn, USA 2011.
- [14] Hammerschmidt, D. And Kvisteroey, T.: *Capacitive measurement of tire deformation*, patent: US 7,543,491. USA 2009.
- [15] Hanada, R. and Seto, H.: *Method for measuring deformation of tire tread*, patent: US 8,037,744. USA 2011.
- [16] Hiraoka, N., Matsuzaki, R. and Todoroki, A.: *Current Monitoring of In-plane and Out-of-plane Displacement of Tire Using Digital Image Correlation Method*. Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, J-STAGE, vol. 3., no. 11, 2009.
- [17] Kosiara, A.: *Control effectiveness comparison of wheel loader's longitudinal vibrations by means of passive and active vibration stabilisers*. Journal of KONES Powertrain and Transport, Vol. 18, 2011, ss. 287 – 294.
- [18] Matsuzaki, R., Keathing, T., Todoroki, A. and Hiraoka, N.: *Rubber-based strain sensor fabricated using photolithography for intelligent tires*. Sensors and Actuators A, Elsevier, 148, 2008, ss. 1 – 9.

- [19] Matsuzaki R. and Todoroki A.: *Passive wireless strain monitoring of actual tire using capacitance-resistance change and multiple spectral features*. Sensors and Actuators A, Elsevier, 126, 2006, ss. 277 – 286.
- [20] Matsuzaki R. and Todoroki A.: *Wireless strain monitoring of tires using electrical capacitance changes with an oscillating circuit*. Sensors and Actuators A, Elsevier, 119, 2005, ss. 323 – 331.
- [21] Matsuzaki R. and Todoroki A.: *Wireless flexible capacitive sensor based on ultraflexible epoxy resin for strain measurement of automobile tires*. Sensors and Actuators A, Elsevier, 140, 2007, ss. 32 – 42.
- [22] Matsuzaki, R., Todoroki, A., Kobayashi, H. and Shimamura, Y.: *Passive wireless strain monitoring of a tire using capacitance and electromagnetic induction change*. Advanced Composite Materials, Taylor & Francis, vol. 14, No. 2, 2005, ss. 147 – 164.
- [23] Pohl, A., Steindl, R. and Reindl, L.: *The "Intelligent Tire" Utilizing Passive SAW Sensors – Measurement of Tire Friction*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Institute of Electrical and Electronics Engineers, vol. 48, No. 6, 1999, ss. 1041 – 1046.
- [24] The Apollo Consortium: *Intelligent Tyre for Accident-free Traffic*, Intelligent Tyre Systems – State of the Art and Potential Technologies. IST-2001-34372, 2002.
- [25] Tuononen, A.: *Optical position detection to measure tyre carcass deflections and implementation for vehicle state estimation*, rozprawa doktorska. Helsinki University of Technology, TKK Dissertations 205. Espoo 2009.
- [26] Yi, J.: *A Piezo-Sensor-Based "Smart Tire" System for Mobile Robots and Vehicles*. IEEE/ASME Transactions on Mecha-tronics, Institute of Electrical and Electronics Engineers, vol. 13, No. 1, 2008, ss. 95 – 103.
- [27] Yilmazoglu, O., Brandt, M., Sigmund, J., Genc, E. and Hartnagel, H.I.: *Integrated InAs/GaSb 3d magnetic field sensors for "the intelligent tire"*. Sensors and Actuators A, Elsevier, 94, 2001, ss. 59 – 63.
- [28] Dr. D. Wehrhahn Meßsysteme für die Qualitätssicherung: *Lasermessung in der Reifen- und Gummiindustrie: Karta katalogowa laserowego systemu do pomiaru defromacji ogumienia*, dokument on-line: http://www.drwehrhahn.de/pdf_de_en/deutsch/anwendungsbereiche/gummi_de.pdf, dostęp: 26 stycznia 2015.

BADANIA ODZYSKU ENERGII HAMOWANIA POJAZDU O NAPĘDZIE HYBRYDOWYM

ANDRZEJ GAJEK¹, PIOTR STRZĘPEK²

Politechnika Krakowska

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań odzysku energii hamowania osobowego samochodu o napędzie hybrydowym kół przednich. Badaniom poddano pojazd z szeregowo równoległym, spalino-elektrycznym, hybrydowym układem napędowym. Układ ten umożliwia zamianę rodzaju pracy silnika elektrycznego na pracę prądnicową i ładowanie baterii wysokonapięciowej z wykorzystaniem energii hamowania. Wykonano pomiary prądu ładowania baterii podczas hamowania przy różnych opóźnieniach ruchu pojazdu. Przeanalizowano algorytm sterowania prądem ładowania, udział energii odzyskanej w stosunku do całkowitej energii hamowania oraz moc hamowania odzyskowego w stosunku do całkowitego zapotrzebowania mocy hamowania. Przedstawiono chwilowe zapotrzebowanie mocy przy hamowaniu na jezdni poziomej o niewielkim współczynniku oporów toczenia. Przebadano udział mocy elektrycznej w bilansie energetycznym hamowania oraz zapotrzebowanie i odzysk energii podczas procesu hamowania.

Słowa kluczowe: pojazd o napędzie hybrydowym, hamowanie odzyskowe, energia hamowania, moc hamowania

1. Wstęp

W związku z zaostrzaniem przepisów dotyczących toksyczności spalin oraz ograniczaniem emisji dwutlenku węgla do atmosfery, producenci pojazdów poszukują możliwości zmniejszenia zużycia paliwa przez samochody. Jednym ze sposobów zmniejszenia zużycia paliwa, a więc i wydzielania dwutlenku węgla, są napędy hybrydowe elektryczno-spalinowe. Obecnie obserwuje się szybki rozwój samochodów z tego typu napędem, zarówno osobowych jak i autobusów. W porównaniu do pojazdów z silnikami tylko spalinowymi, charakteryzują się znacznie mniejszym zużyciem paliwa ropopochodnego oraz możliwością jazdy tylko z wykorzystaniem silnika elektrycznego, przy zerowej emisji spalin, co jest szczególnie ważne w ruchu miejskim.

¹ Politechnika Krakowska, Instytut Pojazdów Samochodowych i Silników Spalinowych, al. Jana Pawła II 37, 31-364 Kraków, e-mail: gajeka@mech.pk.edu.pl

² Politechnika Krakowska Instytut Pojazdów Samochodowych i Silników Spalinowych, al. Jana Pawła II 37, 31-364 Kraków, e-mail: piotrs@mech.pk.edu.pl

Jednym ze sposobów ograniczenia zużycia paliwa i wydłużenia przebiegu pojazdu z użyciem napędu elektrycznego jest możliwość odzysku (rekuperacji) energii hamowania [1, 2, 6].

Możliwe są dwie metody odzysku energii hamowania pojazdów hybrydowych:

- napęd prądnicy bezpośrednio od kół pojazdu i ładowanie baterii wysokonapięciowej,
- stosowanie superkondensatorów.

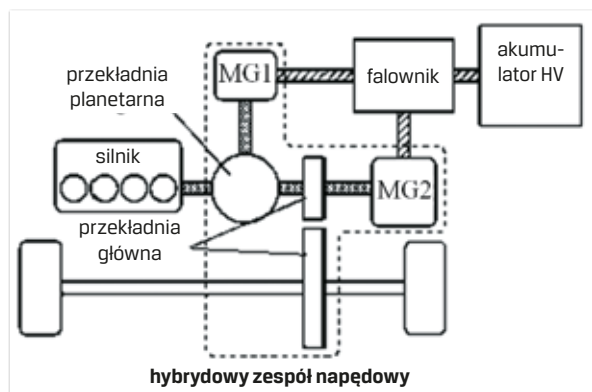
Ładowanie odzyskowe baterii pozwala na zgromadzenie dużej ilości energii w stosunku do możliwości kondensatorów, ale wymaga odpowiedniego czasu hamowania. Natomiast ładowanie kondensatorów pozwala na gromadzenie energii w krótkim czasie. Te dwa „magazyny” energii elektrycznej mogą uzupełniać się wzajemnie.

W celu oszacowania możliwości odzysku energii hamowania w warunkach eksploatacyjnych, przeprowadzono badania drogowe hybrydowego samochodu osobowego z szeregowo równoległym układem napędowym oraz odzyskowym ładowaniem baterii.

2. Obiekt badań

Obiektem badań był samochód osobowy z szeregowo równoległym hybrydowym układem napędowym, z rozdziałem mocy (rys. 1). Dzięki zastosowaniu przekładni obiegowej, łączącej silnik spalinowy, generator i silnik elektryczny oraz systemu sterowania przepływem mocy, uzyskano dowolne sumowanie mocy obu silników: spalinowego i elektrycznego. Układ ten umożliwia napęd kół tylko silnikiem elektrycznym lub spalinowym, albo równocześnie obydwoma silnikami oraz ładowanie baterii wysokonapięciowej w poszczególnych fazach pracy układu. Możliwe jest również hamowanie elektrodynamiczne kół przednich poprzez zmianę pracy silnika elektrycznego MG2 na pracę prądnicową (generatorową). Zasadniczy układ hamulcowy, działający na wszystkie koła pojazdu, to system elektrohydrauliczny z czujnikiem przemieszczenia i symulatorem siły nacisku na pedał hamulca oraz pompą wysokiego ciśnienia i akumulatorem ciśnienia. W fazie hamowania sterownik hamulców otrzymuje sygnał z czujnika przemieszczenia pedału hamulca i z czujnika ciśnienia. Jest to tzw. funkcja feeling.

Sygnał ten jest podstawową informacją o zamierzonym opóźnieniu hamowania, jakiego wymaga kierowca. Na tej podstawie program w sterowniku hamulców oblicza wymagane siły hamujące odpowiadające zadanemu opóźnieniu i uruchamia hamowanie hydrauliczne wszystkich kół oraz hamowanie elektrodynamiczne kół przednich, sterując napięciem i prądem ładowania baterii wysokonapięciowej. Ciśnienie w zaciskach hamulców jest mierzone w sposób ciągły i dostosowywane do wymaganego opóźnienia pojazdu i poślizgu kół, z uwzględnieniem hamowania elektrycznego. W procesie hamowania bierze udział również silnik spalinowy, przy czym hamowanie silnikiem jest minimalizowane przez zastosowanie zmiennych faz rozrządu, obniżających w tym okresie ciśnienie sprężania (tzw. obieg Atkinsona) w celu zwiększenia odzysku energii elektrycznej.

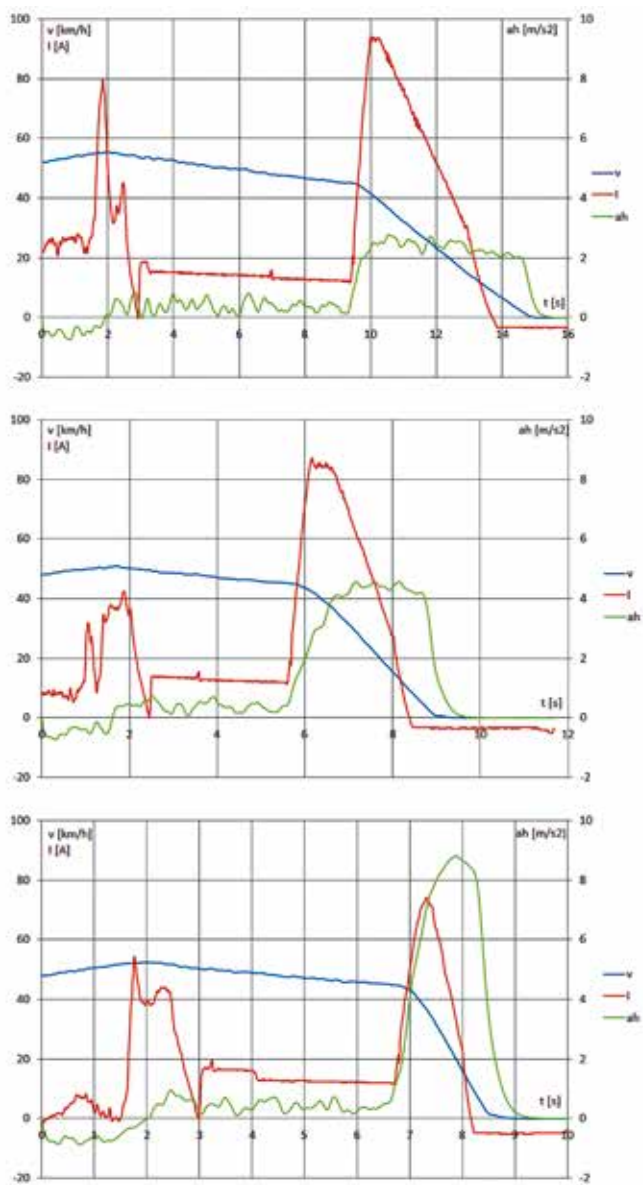


Rys. 1. Schemat układu napędowego badanego samochodu hybrydowego. MG1 – prądnica, MG2 – silnik elektryczny [9]

3. Badanie odzysku energii

Badania odzysku energii przeprowadzono na prostym odcinku drogi, na jezdni betonowej, płaskiej, suchej. Samochód rozpędzono do prędkości 50 km/h, 70 km/h i 90 km/h, a następnie hamowano ze stałym naciskiem na pedał hamulca, aż do zatrzymania pojazdu. Nacisk ten dobierano tak, aby uzyskać hamowanie łagodne (opóźnienie około 2 m/s^2), średnie (około 4 m/s^2) i intensywne (ponad 6 m/s^2). Stopień naładowania baterii wysokonapięciowej NiH (napięcie nominalne 201,6 V, pojemność 6 Ah [9]) przed hamowaniami utrzymywano na stałym poziomie około 30%. Dla każdej prędkości początkowej wykonywano n powtórzeń pomiarów, rejestrując wartości prędkości pojazdu, nacisk na pedał hamulca i wartość prądu ładowania baterii w czasie hamowania. Mierzono również napięcie ładowania baterii. Przykładowe wyniki pomiarów przedstawiono na rys. 2 i 3.

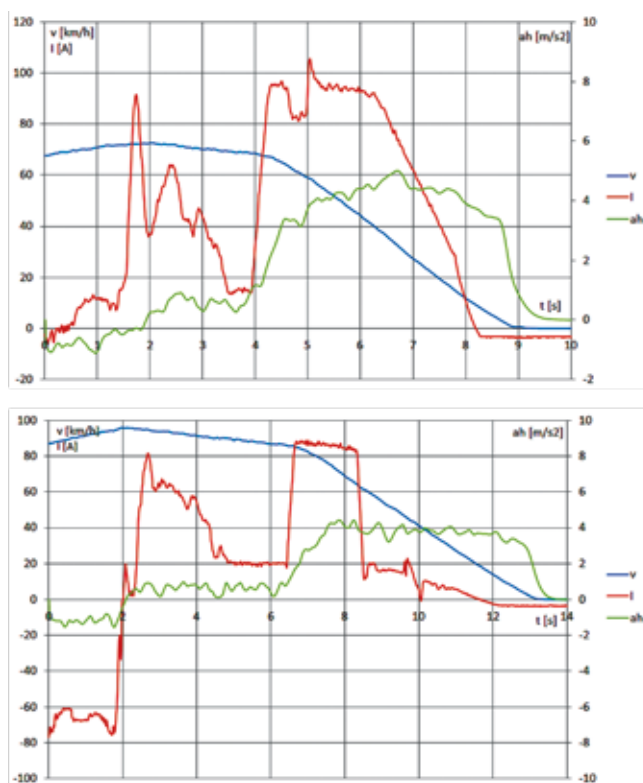
We wszystkich przypadkach hamowania odzyskowego następowało wystawienie prądu ładowania baterii na wartość maksymalną ($90 \div 100$) A (bateria niklowo-wodorkowa). Napięcie ładowania wynikało z ograniczenia dopuszczalnej mocy ładowania tego typu baterii oraz z algorytmu sterowania ładowaniem. Wartość maksymalną prądu utrzymywano była przez krótki okres hamowania, a następnie prąd ładowania był stopniowo ograniczany aż do zaniku przy prędkości około ($10 \div 15$) km/h. W kilku przebiegach hamowania wartość prądu maksymalnego była ograniczana ze względu na wzrost temperatury baterii. Po osiągnięciu prędkości samochodu około 10 km/h hamowanie elektrodynamiczne zanikało. Charakterystyczne jest również pojawienie się „piku” prądowego rzędu ($50 \div 80$) A w chwili przechodzenia z fazy napędu w fazę jazdy z hamowaniem silnikiem spalinowym, po czym wartość prądu ładowania obniżała się do około 15 A, a samochód zwalniał z opóźnieniem średnim około $0,5 \text{ m/s}^2$. Dobór prądu ładowania baterii w tym okresie związany był z realizacją opóźnienia ruchu pojazdu hybrydowego, takiego jakie występuje w normalnych



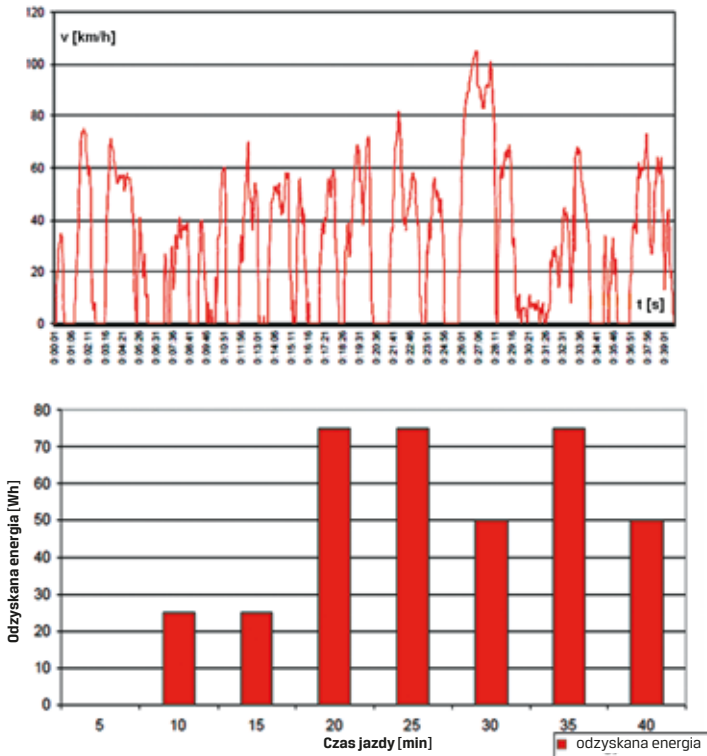
Rys. 2. Prąd ładowania odzyskowego przy różnych opóźnieniach hamowania dla prędkości początkowej równej 50 km/h

warunkach ruchu, dla pojazdów konwencjonalnych, po zwolnieniu pedału przyspieszenia i hamowaniu silnikiem. W tej fazie ruchu samochodu hybrydowego występowało również hamowanie od silnika spalinowego, ale ograniczone było poprzez przestawienie faz rozrządu, powodujące znaczne zmniejszenie ciśnienia sprężania silnika.

Przeprowadzono również badania eksploatacyjne odzysku energii w warunkach ruchu miejskiego. Przykładowo, podczas 40-minutowego cyklu jezdnego w rzeczywistych warunkach ruchu (zmiany prędkości pokazano na rys. 4) układ rekuperacji energii pozwolił na odzysk 375 Wh energii (dokładność $\pm 5\%$).



Rys. 3. Prąd ładowania odzyskowego podczas hamowania z opóźnieniem równym $(4 \div 4,5) \text{ m/s}^2$, prędkość początkowa równa 70 km/h i 90 km/h



Rys. 4. Prędkość samochodu oraz energia odzyskana w cyklu jazdy miejskiej [7]

4. Analiza wyników badań

Analizę możliwości odzysku energii hamowania przeprowadzono dla następującego bilansu energetycznego:

$$E = E_h + E_a + E_t \quad (1)$$

gdzie

$$E = \int_0^t m a_h v(t) dt + \sum_1^4 \int_0^t I_k \varepsilon_k(t) \omega_k(t) dt$$

E_h – energia wytracana przez układ hamulcowy pojazdu i opory ruchu silnika,

E_a – energia wytracana przez siły oporu aerodynamicznego,

$$E_a = \int_0^t c_x A v(t)^2 \frac{\rho}{2} v(t) dt$$

E_t – energia wytracana przez siły oporu toczenia,

$$E_t = \int_0^t mgfv(t) dt$$

m – masa pojazdu,

I_k – moment bezwładności ciał wirujących (kół),

v, ω – prędkość hamowania: liniowa pojazdu i kątowna kół,

a_h, ε_k – opóźnienie pojazdu i koła,

c_x – współczynnik oporu aerodynamicznego pojazdu,

A – pole powierzchni czołowej pojazdu,

ρ – gęstość powietrza,

f – współczynnik oporów toczenia.

Pomijając energię E_t , jako małą, można zapisać:

$$E_h = \int_0^t m a_h v dt + \sum_1^4 \int_0^t I_k \varepsilon_k \omega_k dt - \int_0^t c_x A v^2 \frac{\rho}{2} v dt \quad (2)$$

Wartość energii E_h niezbędnej do zatrzymania pojazdu, jaką wytwarzał układ hamulcowy badanego samochodu, obliczano dla pojazdu o masie 1475 kg, współczynniku oporu aerodynamicznego 0,25 i powierzchni czołowej 2,2 m². Ilość energii zgmagazynowanej w baterii wysokonapięciowej podczas hamowania obliczano z zależności:

$$E_{reg} = \int_{t_1}^{t_2} U(t) I(t) dt \quad (3)$$

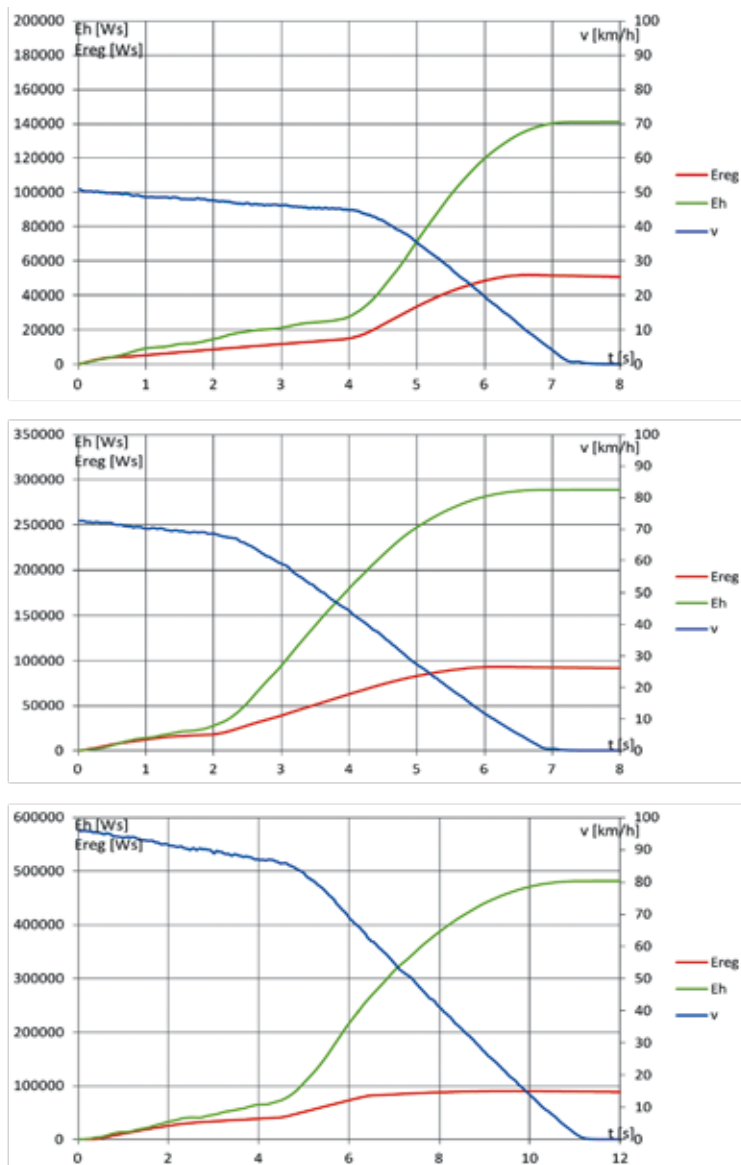
where:

U – napięcie ładowania baterii,

I – prąd ładowania baterii,

$t_2 - t_1$ – czas ładowania odzyskowego w fazie zwalniania pojazdu.

Przykładowe wyniki obliczeń energii zużywanej do zmniejszania prędkości samochodu aż do jego zatrzymania oraz energii elektrycznej odzyskanej, w funkcji czasu hamowania, dla różnych początkowych prędkości hamowania, przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Energia E_h zużyta podczas hamowania samochodu oraz energia elektryczna E_{reg} odzyskana, w zależności od czasu hamowania. Opóźnienie hamowania ($4 + 4,5$) m/s²

Współczynnik odzysku energii hamowania obliczano jako:

$$k_{reg} = \frac{E_{reg}}{E_h} \cdot 100[\%] \quad (4)$$

Wyniki badań wskazują, że w czasie zwalniania bez nacisku na pedał hamulca, odpowiadającego hamowaniu silnikiem w pojeździe konwencjonalnym, współczynnik odzysku energii osiągał wartość około (32 ÷ 45)%. Pozostała część całkowitej energii hamowania pojazdu przypada na hamowanie silnikiem, opory ruchu układu napędowego i opory powietrza. Dla hamowań wymuszonych, w zakresie początkowych prędkości (50 ÷ 90) km/h. i opóźnień hamowania (2 ÷ 4) m/s² współczynnik odzysku energii zawierał się w szerokim zakresie: od około 16% do 45%. Wartość energii odzyskanej w pojedynczych cyklach hamowań nie przekraczała około 100 000 Ws (1 W razy 1 s to 1 J).

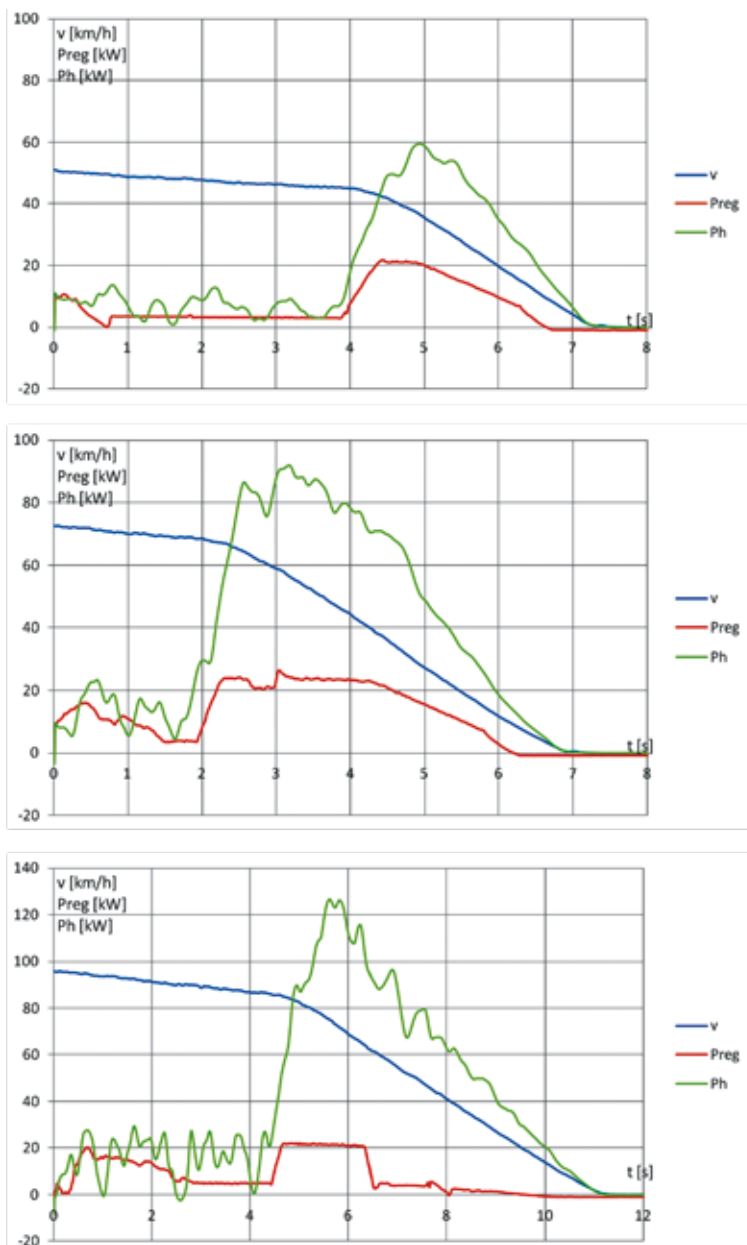
Przeanalizowano również zapotrzebowanie mocy hamowania P_h i moc hamowania odzyskowego P_{reg} , obliczanych według zależności:

$$P_h = (ma_h - c_x A v^2 \rho / 2) v(t) \quad (5)$$

$$P_{reg} = U(t) I(t) \quad (6)$$

Przykładowe wyniki przedstawiono na rys. 6.

Wyniki badań wykazały, że moc hamowania odzyskowego (elektrycznego) była 2 do 6 razy mniejsza od maksymalnego zapotrzebowania na moc hamowania. Wynika to głównie z ograniczenia mocy ładowania baterii wysokonapięciowej (dla badanego pojazdu z baterią NiH wynosiła ona około 25 kW) oraz z maksymalnej mocy, jaką może osiągnąć prądnica pojazdu w stosunku do chwilowej mocy hamowania. Przykładowo, przy początkowej prędkości 70 km/h i opóźnieniu (2 ÷ 3) m/s², początkowa moc hamowania badanego pojazdu wynosiła (60,5 ÷ 90,5) kW, wobec maksymalnej mocy generatora 50 kW. Przy początkowej prędkości 50 km/h i zakresie opóźnienia (2 ÷ 3) m/s² początkowa moc hamowania wynosiła (43 ÷ 65) kW. Przy tej prędkości współczynnik odzysku energii hamowania obliczany z zależności (4) jest większy od tego współczynnika obliczanego dla prędkości początkowej hamowania 70 km/h i 90 km/h. Ilość odzyskanej energii zależy również od stopnia naładowania baterii przed rozpoczęciem hamowania i jej stanu cieplnego.



Rys. 6. Zapotrzebowanie mocy hamowania i moc hamowania odzyskowego, dla różnych początkowych prędkości samochodu

5. Podsumowanie

Badania wykazały, że dotychczasowe rozwiązania układów odzysku energii hamowania nie wykorzystują pełnych możliwości tego procesu. Problem ten wymaga dalszych teoretycznych i praktycznych prac. Duży odzysk energii możliwy jest pod warunkiem odbioru energii mechanicznej od kół przednich i tylnych samochodu. Zamiana energii mechanicznej na elektryczną w samochodach osobowych wymaga generatorów o mocy rzędu 100 kW i większej. Rozwój techniki odzysku energii na drodze elektrycznej powinien uwzględniać problem szybkości i ilości jej gromadzenia. Stosowane baterie mają pojemność elektryczną umożliwiającą gromadzenie energii odzyskiwanej w procesie pojedynczych zahamowań. Natomiast nie pozwalają na odebranie tej energii w krótkim czasie hamowania. Mogą to zapewnić połączone układy superkondensatorów i baterii wysokonapięciowej oraz sterowanie odzyskiem energii hamowania zarówno z kół przednich, jak i tylnych pojazdu.

Superkondensatory umożliwiają gromadzenie energii w krótkim czasie, charakteryzują się dużą gęstością mocy (W/kg). Zapewniają odpowiednią moc odzysku energii, ale możliwość jej gromadzenia jest niewielka. Baterie pozwalają na gromadzenie znacznie większej ilości energii, ale w dłuższym okresie. Mają gęstość energii (Wh/kg) około 10 – krotnie większą od superkondensatorów [4]. Energia zgromadzona ma wpływ na zasięg pojazdu między ładowaniami, moc źródła energii elektrycznej wpływa na dynamikę pojazdu i szybkość odzysku energii. Stosowanie równocześnie odzysku energii przez superkondensatory i baterię zwiększa wydajność tego procesu, ale znacznie komplikuje układ elektronicznego przetwarzania energii elektrycznej.

Dotychczas praktyczne zastosowanie superkondensatorów do odzysku energii wprowadziła firma Mazda pod nazwą i-ELOOP (*Intelligent Energy Loop*) [8, 10]. Odzysk energii odbywa się poprzez ładowanie superkondensatora przez alternator pracujący z napięciem podwyższonym do 25 V. Ładunek zgromadzony w kondensatorze, poprzez konwerter DC obniżający napięcie, ładuje baterię 12 V oraz zasila odbiorniki. Praca alternatora przy napięciu podwyższonym odbywa się w czasie hamowania silnikiem i podczas normalnego hamowania.

Literatura

- [1] Burnham K. J., Gajek A., Oleksowicz S.: *Regenerative Braking Mode, Legal, Safety and Control Consideration*. Mechanika. Czasopismo Techniczne. Politechnika Krakowska 2012, nr 5M.
- [2] Burnham K. J., Oleksowicz S.: *Assessment of Hybrid Vehicle Braking Technologies*. Mechanika. Czasopismo Techniczne. Politechnika Krakowska 2012, nr 3M.
- [3] Chłopek Z.: *Badanie zużycia energii przez samochód elektryczny*. The Archives of Automotive Engineering. PIMOT, vol. 57, no 3, 2012. ISSN 1234-754X.
- [4] Informacja serwisowa Mazda 6, 2013.
- [5] Juda Z.: *Zastosowanie superkondensatorów w układzie odzysku energii pojazdu z napędem elektrycznym*. Mechanika. Czasopismo Techniczne. Politechnika Krakowska 2008, nr 6M.
- [6] Juda Z.: *Zastosowanie zaawansowanych źródeł energii w miejskich pojazdach elektrycznych z funkcją odzysku energii*. Mechanika. Czasopismo Techniczne. Politechnika Krakowska 2012, nr 5M.

- [7] Materiały Toyota Motor Corporation, Prius, 2010.
- [8] Pawelek M.: *Badania sterowania układem napędowym pojazdu hybrydowego w warunkach ruchu miejskiego*. Praca dyplomowa, 2012. Promotor A. Gajek.
- [9] Wei L.: *Hybrid Vehicle System Modeling and Control*. Published by J.Wiley & Sons - USA. 2013.
- [10] <http://motoryzacja.wnp.pl/i-loop>: Patent Mazdy na odzyskiwanie energii podczas hamowania, data dostępu 24.03.2015.