

BEZPRZEWODOWY POMIAR CIŚNIENIA I TEMPERATURY POWIETRZA W KOLE SAMOCHODOWYM

Sławomir GRYŚ, Maciej TKACZ, Marcin GANCARCZYK¹

Wydział Elektryczny, Politechnika Częstochowska
tel.: 34 3250883, e-mail: grys@el.pcz.czest.pl

Streszczenie: Publikacja ma charakter dydaktyczno-popularyzatorski z zakresu nauczania metrologii, w szczególności systemów pomiarowych. W artykule przedstawiono problematykę bezprzewodowego bezpośredniego pomiaru ciśnienia oraz temperatury powietrza w kole samochodowym. Zostało stworzone stanowisko laboratoryjne pozwalające na zapoznanie się z metodą pomiaru oraz elementami systemu TPMS (ang. Tire Pressure Measurement System), jednego z nowoczesnych systemów bezpieczeństwa stosowanych w branży motoryzacyjnej. W artykule opisano konstrukcję oraz zasadę działania poszczególnych elementów stanowiska, budowę zintegrowanego czujnika, sposób komunikacji z modułem odbiorczym TPMS. Ponadto, przedstawiono obsługę stanowiska, sposób przeprowadzenia pomiarów, metodę adiustacji wskazań czujników z wykorzystaniem przyrządów kontrolnych.

Słowa kluczowe: technika samochodowa, czujnik ciśnienia i temperatury, adiustacja dwupunktowa, procesor stm32.

1. WPROWADZENIE

Obserwowany w ostatniej dekadzie znaczny wzrost natężenia ruchu ulicznego podnosi ryzyko kolizji lub wypadku komunikacyjnego. Dbając o bezpieczeństwo kierowcy, pasażerów i innych użytkowników dróg producenci pojazdów montują w nich coraz bardziej zaawansowane systemy. Zadaniem systemów pasywnych jest zmniejszenie do minimum skutków zaistniałego zdarzenia, a systemów aktywnych zmniejszenie prawdopodobieństwa ich wystąpienia. Do klasycznych przykładów należą systemy bezpieczeństwa, tj.: ABS (ang. Anti-Lock Braking System), BAS (ang. Brake Assist System), EBD (ang. Electronic Brakeforce Distribution), ESP (ang. Electronic Stability Program) wspierające kierowcę w utrzymaniu kontroli nad pojazdem w trudnych warunkach jazdy. Współczesne samochody dostarczają również wielu dodatkowych informacji z szeregu czujników, kamer czy radaru oraz umożliwiają jazdę półautomatyczną, np. oświetlanie kierunku jazdy, utrzymywanie pojazdu na wyznaczonym pasie ruchu, wykrywanie martwego pola w lusterku bocznym, automatyczne poruszanie się w korku i hamowanie, łagodzenie skutków kolizji dzięki użyciu poduszek powietrznych, kurtyn boczne oraz automatycznych napinaczy pasów bezpieczeństwa. Pożyteczne też stają się systemy automatycznego rozpoznania znaków drogowych czy wykrywające zmęczenie kierowcy [1-2]. W samochodach zaliczanych do wyższej klasy montowane są również kamery termowizyjne, bardzo przydatne w

warunkach nocnych, umożliwiające wcześniejszą reakcję kierowcy na pojawienie się na drodze pieszego czy zwierząt domowych lub dzikich w terenach niezabudowanych i leśnych.

Jedną z takich pożytecznych funkcji informacyjnych jest system monitorowania ciśnienia powietrza oraz opcjonalnie temperatury w kołach pojazdu. Pomaga utrzymać optymalne ciśnienie w oponach co wydłuża czas ich użytkowania a także zmniejsza opory toczenia, co zaś przekłada się na zmniejszenie spalania paliwa. Obniżone ciśnienie zwiększa natomiast drogę hamowania, co jest często czynnikiem decydującym o zdrowiu i życiu uczestników ruchu komunikacyjnego. Podwyższenie temperatury wewnątrz koła może świadczyć o zwiększonych oporach toczenia, np. na skutek wytarcia okładzin klocków hamulcowych, zniekształcenia geometrii opony lub felgi.

Zgodnie z Rozporządzeniem 661/209 Europejskiego Parlamentu z dnia 13 lipca 2009 od dnia 01.11.2012 r. system monitorowania ciśnienia w oponach stał się obowiązkowym elementem wyposażenia pojazdów samochodowych ubiegających się o homologację w krajach Unii Europejskiej, których dopuszczalna masa całkowita nie przekracza 3500 kg [3]. Od 01.11.2014 r. TPMS jest montowany w każdym nowym samochodzie produkowanym oraz sprzedawanym na terenie krajów członkowskich. Unia Europejska podążyła śladem Stanów Zjednoczonych, gdzie system pomiaru ciśnienia w oponach jest obowiązkowy od 2007 dla samochodów osobowych, dostawczych oraz ciężarowych o dopuszczalnej masie całkowitej nie przekraczającej 4536 kg [4].

2. SYSTEMY TPMS

Historia układów do pomiaru ciśnienia w oponach sięga roku 1907, kiedy to w pojeździe „Northern” wyprodukowanym w USA zastosowano pneumatyczny układ hamulcowy oraz urządzenie do zmian ciśnienia w kołach samochodu. Współcześnie stosowane systemy można podzielić na pośrednie i bezpośrednie. Oba rozwiązania różnią się od siebie sposobem przeprowadzania pomiarów, działania i montażu, żywotnością, sposobem użytkowania, serwisowania oraz kosztami eksploatacji.

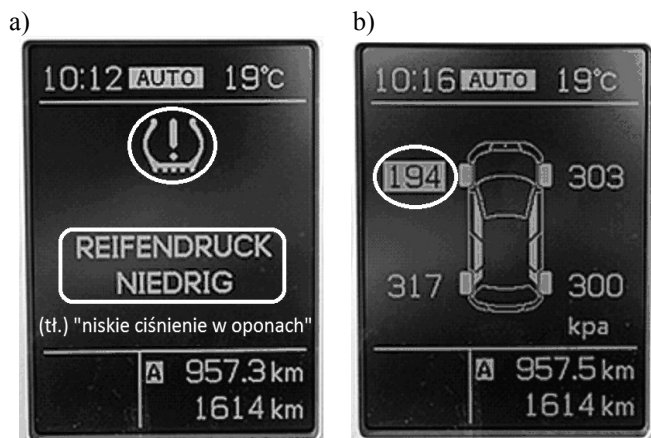
2.1. Pomiar metodą pośrednią

Układ pośredniego pomiaru ciśnienia opiera się na odczytach danych z czujników systemów ABS/ESP. Układ

ECU wnioskuję o zmianie ciśnienia na podstawie pozornej zmiany średnicy koła. Wykrycie anomalii odbywa się przez stwierdzenie znacznej różnicy w prędkości obrotowej koła względem prędkości pozostałych kół. Z tego względu właściwie system nie mierzy ciśnienia, a jedynie sygnalizuje jego odchyłkę od wartości znamionowej (po napompowaniu wszystkich kół do tej samej wartości), przekraczającą przeważnie 30-40 %. Jeśli ciśnienie we wszystkich kołach jest nieprawidłowe, lecz na podobnym poziomie, system jest "ślepy" i nie wykrywa nieprawidłowości. Kolejną wadą systemu pośredniego jest brak możliwości kontroli w czasie postoju. System działa od prędkości około 40 km/h.

2.2. Pomiar metodą bezpośrednią

Bezpośredni system TPMS składa się z czujników umieszczonych wewnątrz każdego z kół oraz modułu odbiorczego zamontowanego w karoserii pojazdu. Moduł ten łączy się bezprzewodowo z każdym z czujników, analizuje dane a następnie przesyła do urządzeń informujących użytkownika pojazdu. Zależnie od opcji kierowca jest powiadamiany o konieczności kontroli ciśnienia w ogumieniu pojazdu - wersja Low Line lub w wersji pełnej, tzw. High Line, system informuje użytkownika na bieżąco o stanie ciśnienia oraz opcjonalnie temperatury w każdym z kół. Rysunek 1 pokazuje różnice w sposobie wizualizacji danych w wersjach Low oraz High Line.

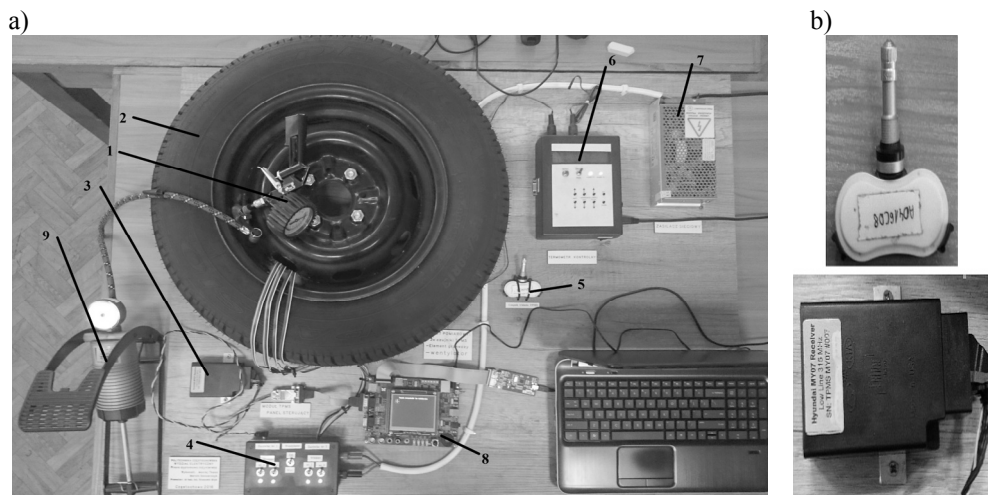


Rys. 1. Przykładowa wizualizacja danych w wersji Low (a) oraz High Line (b) - na podstawie [5]

3. STANOWISKO BADAWCZE

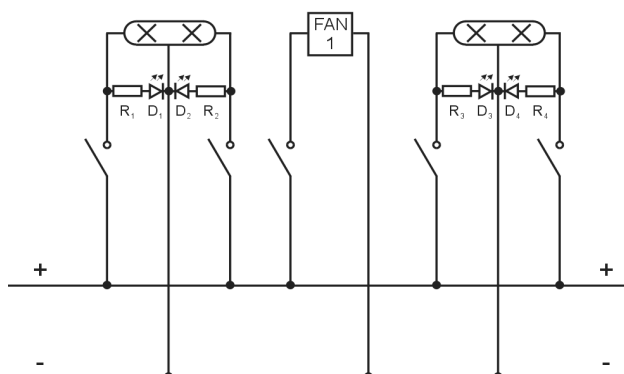
3.1. Koncepcja stanowiska

W celach poznawczych oraz edukacyjnych stworzono w Zakładzie Techniki Mikroprocesorowych, Automatyki i Pomiarów Ciepłych Wydziału Elektrycznego Politechniki Częstochowskiej stanowisko do badania systemu bezprzewodowego pomiaru ciśnienia i temperatury w kole samochodowym metodą bezpośrednią. Stanowisko powstało jako praktyczny efekt realizacji prac dyplomowych współautorów artykułu pod opieką promotora dra hab. inż. Sławomira Grysia, prof. PCz. [6-7]. Umożliwia ono zapoznanie się z elementami systemu, przeprowadzenie pomiarów z czterech czujników typu MEMS (3 wewnątrz koła, 1 na zewnątrz), kalibrację dwupunktową względem wskazań przyrządów kontrolnych, archiwizację oraz wizualizację danych w systemie mikroprocesorowym. Rysunek 2 przedstawia stanowisko z widocznymi wszystkimi jego elementami. Składa się ono z koła samochodowego - 2 będącego obiektem pomiarowym, wewnątrz którego po obwodzie umieszczono trzy bezprzewodowe czujniki TPMS produkowane przez TRW w wersji 07' MY Sonata oraz dwie klasyczne dwuwłóknowe żarówki samochodowe, każda o mocy 45 W. Żarówki służą za źródło ciepła w celu symulacji wzrostu temperatury powietrza w realnych warunkach użytkowania pojazdu. Dodatkowo, w kole zabudowano niewielki wentylator, wymuszający szybsze wyrównanie temperatury. Przy włączonym wentylatorze czujniki wewnątrz koła mierzą prawie tę samą temperaturę, co umożliwia wyznaczenie ich krzywych kalibracji oraz porównanie dokładności. Do sterowania elementami grzewczymi oraz wentylatorem służy układ sterowania - 4, którego schemat przedstawiono na rysunku 3. Do zasilania żarówek, wentylatora oraz modułu TPMS - 3, służącego do odbioru danych z czujników znajdujących się w kole oraz dodatkowego czujnika, użyto zasilacza sieciowego - 7 o mocy 120 W i prądzie znamionowym 10 A. Zasilacz posiada zabezpieczenia przeciwzwarceniowe i przepięciowe. Czujnik - 5 został umieszczony na zewnątrz koła w celach poglądowych, mierzy ciśnienie i temperaturę otoczenia. Pompowanie koła odbywa się za pomocą pompki nożnej - 9, a kontrolowane obniżanie ciśnienia przez zawór spustowy zintegrowany z manometrem kontrolnym - 1.



Rys. 2. a) Stanowisko do bezprzewodowego pomiaru temperatury i ciśnienia powietrza w kole samochodowym: 1 - ciśnieniomierz kontrolny, 2 - koło, 3 - moduł TPMS, 4 - panel sterujący elementami grzewczymi oraz wentylatorem, 5 - czujnik ciśnienia i temperatury, 6 - termometr kontrolny, 7 - zasilacz sieciowy, 8 - system z procesorem stm32 (ARM), 9 - pompka nożna, b) czujnik i moduł TPMS [6]

Zastosowano również kontrolny termometr elektroniczny - 6 wskazujący wartość temperatury otoczenia oraz wewnątrz koła samochodowego, dzięki zabudowanemu w nim czujnikowi półprzewodnikowemu. Termometr wskazuje wartość temperatury w czasie rzeczywistym i ma możliwość ustawienia alarmu przekroczenia temperatury. Komunikacja z dedykowanym dla marki Hyundai modulem TPMS MY07 Receiver jest nawiązywana za pomocą komputera PC lub systemu wbudowanego - 8.



Rys. 3. Schemat panelu sterującego: załączanie elementów grzewczych (włókna żarówek), wentylator (FAN1), LED-owe obwody sygnalizacji (R₁₋₃, D₁₋₃) [6]

3.2. Zintegrowany czujnik ciśnienia i temperatury

Typowy sensor TPMS składa się z plastikowej obudowy, wewnątrz której znajdują się układy elektroniczne czujnika oraz elementy klasycznego zaworu wentyla. W układzie znajduje się piezorezystor do pomiaru ciśnienia w oponie oraz półprzewodnikowy czujnik temperatury. Układ jest wyposażony w antenę, która komunikuje się z modulem odbiorczym TPMS na częstotliwościach fal radiowych 315 MHz ze względu na przeznaczenie modułu na rynek amerykański. W Europie systemy pracują w ogólnodostępnym paśmie radiowym w widmie UHF, tj. 433 MHz. Najważniejszą częścią czujnika TPMS jest miniaturowy układ mechaniczno-elektryczny zasilany baterią litowo-jonową o napięciu znamionowym 3,6 V i zakładanej żywotności ok. 5-7 lat. W systemach wyższej klasy (High Line) stopień rozładowania baterii jest przekazywany do aplikacji komputera pokładowego i opcjonalnie dostępny dla użytkownika pojazdu. Pomiar ciśnienia powietrza w kole odbywa w układzie mostka z 4 czujnikami piezorezystancyjnymi. Przy braku ciśnienia rezystancje wszystkich gałęzi mostka są jednakowe i otrzymuje się zerowy sygnał wyjściowy. Pod wpływem ciśnienia rezystory tworzące mostek zmieniają swoją rezystancję: dwa z nich zwiększają, a dwa pozostałe zmniejszają. Im wyższe ciśnienie tym większe rozstrojenie mostka. Sygnał wyjściowy mostka jest więc miarą oddziałującego ciśnienia [8].

3.3. Moduł odbiorczy TPMS

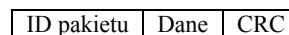
Zadaniem modułu jest pośredniczenie w komunikacji pomiędzy czujnikami a komputerem pokładowym, przekazującym dane na tablicę rozdzielczą samochodu. W rzeczywistych warunkach pracy moduł podłączony jest do pokładowej sieci CAN lub LIN. Odbiornik posiada trzy tryby pracy. Są to: tryb spoczynku, testu oraz normalnej pracy. W trybie spoczynku moduł jest całkowicie nieaktywny. W trybie testowym włączone jest odbieranie sygnałów, jednak funkcja automatycznej identyfikacji

czujników pozostaje nieaktywna. W trybie normalnym czujnik ma pełną funkcjonalność. Prawidłowa praca odbiornika jest zapewniona w zakresie temperatury od -40 °C do 120 °C. Na opisywanym stanowisku badawczym odbiornik przymocowany jest do płyty montażowej za pomocą szyny DIN. W przypadku tego odbiornika stosowanego w samochodach marki Kia i Hyundai jest to oryginalny sposób montażu odbiornika w pojeździe.

3.4. Komunikacja z modulem odbiorczym TPMS

Moduł odbiorczy TPMS łączy się z komputerem PC lub systemem wbudowanym za pomocą przewodowego interfejsu RS232. W obu przypadkach parametry łącza szeregowego są następujące: tryb asynchroniczny, brak bitu przystości, 1 bit stopu, prędkość transmisji 9600 bodów. System wbudowany składa się z platformy rozwojowej Redbull v3 z 32 bitowym procesorem ARM Cortex-M3 (STM32F103ZE), wyposażonej w urządzenia peryferyjne, m. in. dwa porty USART, wyświetlacz graficzny LCD, timery oraz panel dotykowy. Programowanie procesora jest realizowane za pomocą programatora/debugera zgodnego ze standardem JTAG i protokołem OpenOCD. Komunikacja polega na wysłaniu z poziomu komputera/systemu wbudowanego ramki danych. Każda ramka zapytania i odpowiedzi składa się z trzech pól zgodnie z rysunkiem 4:

- identyfikator pakietu o długości 1 bajtu,
- dane o długości zależnej od ID pakietu,
- kod CRC-16-CCITT o długości 2 bajtów (wielomian 0x1021).



Rys. 4. Model ramki danych wysyłanej przez moduł TPMS

ID odpowiedzi jest powtórzeniem ID zapytania powiększonym o wartość szesnastkową 0x80. Poniżej przedstawiono dostępne formaty zapytań.

A. Kontrola obecności modułu oraz poprawności transmisji

- ID zapytania 0x00, długość danych zapytania 0 bajtów, CRC zapytania 0xE1F0.
- ID odpowiedzi 0x80, długość danych odpowiedzi 18 bajtów: bajty 0-15 zawierają napis, tu: „TRW.COM TPMS4PCz” w formacie ASCII, bajty 16 i 17 to główny i dodatkowy numer wersji firmware, CRC zależne od treści napisu (łańcucha znaków).

B. Odczyt danych z czujników

- ID zapytania 0x01, długość danych zapytania 0 bajtów, CRC zapytania 0xF1D1.
- ID odpowiedzi 0x81, długość danych odpowiedzi 16 bajtów, dane zawierają informacje o temperaturze i ciśnieniu każdego z 4 czujników. Każda wartość pomiarowa zapisana jest na dwóch bajtach w następującej kolejności: 0-1 - temperatura czujnika 1, 2-3 - ciśnienie czujnika 1, 4-5 - temperatura czujnika 2, 6-7 - ciśnienie czujnika 2, 8-9 - temperatura czujnika 3, 10-11 - ciśnienie czujnika 3, 12-13 - temperatura czujnika 4, 14-15 - ciśnienie czujnika 4. CRC odpowiedzi zależne od wskazań czujników.

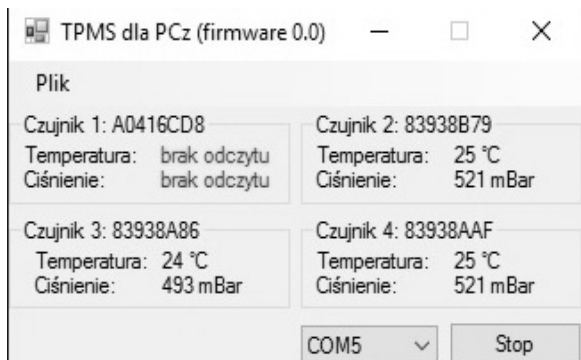
C. Odczyt numerów czujników

- ID zapytania 0x02, długość danych zapytania 0 bajtów, CRC zapytania 0xC1B2.
- ID odpowiedzi 0x82, długość danych odpowiedzi 16 bajtów, dane zawierają informacje w notacji szesnastkowej o

numerach czujników TPMS zapisane na 4 bajtach dla każdego z czujników: 0-3: numer czujnika 1, 4-7: numer czujnika 2, 8-11: numer czujnika 3, 12-15: numer czujnika 4. CRC odpowiedzi zależne od odczytanych numerów czujników.

3.5. Aplikacja na komputer PC

Aplikacja (rys. 5) dokonuje odczytu danych pomiarowych z modułu TPMS, a ponadto może służyć jako aplikacja referencyjna do porównania wskazań z aplikacją dedykowaną na system wbudowany.



Rys. 5. Aplikacja na komputer z systemem Windows [7]

Program co minutę wysyła zapytanie do modułu TPMS i aktualizuje dane pomiarowe w widocznym oknie oraz zapisuje w pliku tekstowym wraz ze znacznikiem czasu do dalszej analizy off-line. Przykładowe pomiary pokazano poniżej na rysunku 6.

```
13:18:05 A0416CD8 83938B79 83938A86 83938AAF
13:18:05 22 0 31 754 31 767 31 767
13:19:05 22 0 30 754 30 767 30 767
13:20:05 22 0 30 754 30 767 30 767
```

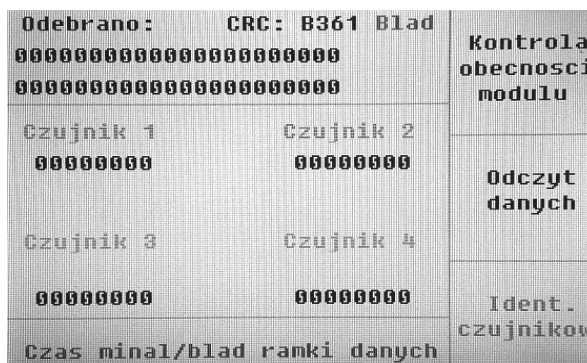
Rys. 6. Fragment pliku z danymi pomiarowymi [7]

3.6. Aplikacja na system wbudowany

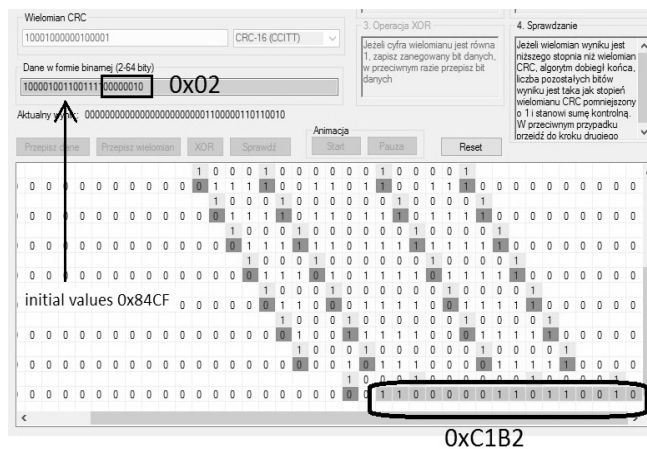
W rzeczywistym pojeździe moduł odbiorczy TPMS komunikuje się z wbudowanym w deskę rozdzielczą systemem mikroprocesorowym. Aby zbliżyć warunki eksperymentu do realnej sytuacji stworzono autorski program w języku C na platformę uruchomieniową z procesorem stm32. Program powstał w zintegrowanym środowisku programistycznym CoCoX CoIDE. Wszelkie dane odebrane z modułu TPMS są wizualizowane w postaci szesnastkowej i dodatkowo wystawiane na drugi port szeregowy w celu ich monitorowania i archiwizowania przez dowolne urządzenie wyposażone w interfejs RS232, np. komputer PC z aplikacją typu HyperTerminal czy Realterm. Podstawowa funkcja programu, tj. "kontrola obecności modułu" odpowiada za sprawdzenie połączenia. W wyniku zapytania moduł TPMS odsyła komunikat zawierający tekst autoprezentacji. Ponieważ znany jest format odpowiedzi procesor spodziewa się założonej ilości bajtów.

Nieudana próba skompletowania ramki danych w przyjętym czasie 1800 ms skutkuje wypisaniem na wyświetlaczu LCD komunikatu o błędzie. Dodatkowo, dla odebranych danych obliczana jest suma kontrolna CRC. Jej wartość różna od zera wskazuje na błąd transmisji, w tym przypadku spowodowany nieodebraniem pełnej ramki danych. Taka sytuacja została zobrazowana na rysunku 7. Widoczny jest komunikat o błędzie CRC jako efekt braku odpowiedzi na zapytanie „identyfikacja czujników”. Prawidłowa odpowiedź będzie zawierać indywidualne

numery poszczególnych czujników. Do obliczania sumy CRC użyto kodu źródłowego udostępnionego na stronie internetowej [9], gdyż wbudowany w procesor stm32 sprzętowy moduł CRC oblicza i sprawdza jedynie sumę dla stałego wielomianu CRC-32. Wysyłane do modułu TPMS zapytanie również jest chronione sumą kontrolną. Na rysunku 8 pokazano parametry użytego kodu CRC-16 CCITT (wielomian, wartość początkowa) oraz sposób wyliczania sumy kontrolnej. Suma jest resztą z dzielenia modulo 2, realizowanego w praktyce przez operację logiczną XOR na fragmencie danych, pozycjonowanym od bitu o wartości 1, i przyjętym wielomianie. Podstawy teoretyczne, wpływ stopnia wielomianu, jego wartości na zdolność detekcji błędów podwójnych i grupowych oraz aspekty praktyczne poddano dyskusji w artykule [10].



Rys. 7. Przypadek wykrycia błędu sumy CRC przy próbie identyfikacji numerów czujników



Rys. 8. Sposób wyliczania sumy CRC dla zapytania 0x02

Najważniejszą funkcją programu uruchamianego w systemie wbudowanym jest możliwość odczytu temperatury i ciśnienia z modułu odbiorczego TPMS. Użytkownik może również za pomocą minidżojstika ustawić temperaturę maksymalną. W dolnej części ekranu wypisywane są numery czujników, których wskazania przekroczyły przyjęty próg alarmowy oraz załączane są diody LED (niewidoczne na rysunku). Rysunek 9 prezentuje odpowiedź na zapytanie "odczyt danych".

Prezentowane dane odpowiadają stanowi początkowego nienapompowanego koła, o ciśnieniu równym ciśnieniu atmosferycznemu i temperaturze pokojowej. Próg alarmu ustawiono na 21 °C, stąd system raportuje jej przekroczenie dla czujników 3 i 4.

Odebrano: CRC: 0000 OK		Kontrola obecności modułu
01F1D1810014000000140000		
0016000000150000C889		
Czujnik 1 020 °C 0000 mBar	Czujnik 2 020 °C 0000 mBar	Odczyt danych
Czujnik 3 022 °C 0000 mBar	Czujnik 4 021 °C 0000 mBar	
Temp. max: 021 °C Alarm temp. na czujniku 3 4		Ident. czujników

Rys. 9. Aktywna funkcja odczytu danych pomiarowych

4. PROPOZYCJA PRZEPROWADZENIA POMIARÓW

Stanowisko umożliwia nauczanie wybranych elementów metrologii, rozumianej jako nauki o "... metodach i narzędziach wykorzystywanych podczas pozyskiwania ilościowej informacji o systemie bądź procesie, jej transmisji, przetwarzania oraz oceny jej niepewności" [11, 12]. Przykładowe zadania to wyznaczenie krzywej wzorcowania, korekcja błędów zera i wzmocnienia (adiustacja) oraz ponowne wzorcowanie.

4.1. Wyznaczanie krzywej wzorcowania

A. Należy napompować oponę do wartości 2,25 Bara wg wskazań manometru kontrolnego. Załączyć elementy grzewcze oraz wentylator i wykonać serię pomiarów temperatury i ciśnienia trzema czujnikami co 5 °C w zakresie zmian 25÷45 °C, przyjmując wskazanie termometru kontrolnego za wzorcowe. Wyłączyć elementy grzewcze.

B. Badania powtórzyć przy wyłączonym wentylatorze.

C. Dla stałej temperatury wewnątrz koła przykładowo 25 °C wykonać serię pomiarów ciśnienia trzema czujnikami co 0,25 Bara w zakresie zmian 2,25±0 Barów. Ciśnienie zmniejszać stopniowo za pomocą zaworu zintegrowanego z manometrem kontrolnym, przyjmując jego wskazanie za wzorcowe.

4.2. Adiustacja wskazań odczytów

Dla tej samej skali dla osi wartości mierzonej i wartości odniesienia, charakterystyka przetwarzania idealnego czujnika (przykładowo temperatury) jest opisana prostą $t=t_w \cdot a+b$, o współczynnikach $a=1$ i $b=0$. Indeks "w" odnosi się do wskazań przyrządu wzorcowego, tu. zewnętrznego termometru elektronicznego. Czujnik charakteryzuje się niedokładnością pomiaru. Adiustacja jego wskazań, zmierzająca do niwelacji błęd pomiaru polega na wyznaczeniu wartości współczynników a , b równania przetwarzania.

$$t_1 = 30, \quad t_2 = 46, \quad t_{w1} = 31, \quad t_{w2} = 48$$

$$t = a \cdot t_w + b$$

$$a = \frac{t_2 - t_1}{t_{w2} - t_{w1}} = \frac{46 - 30}{48 - 31} = 0,94$$

$$\begin{cases} t_1 = a \cdot t_{w1} + b \\ t_2 = a \cdot t_{w2} + b \end{cases}$$

$$b = \frac{(t_1 + t_2) - a(t_{w1} + t_{w2})}{2} = \frac{(30 + 46) - 0,94(31 + 48)}{2} = 0,87$$

$$t' = t_w = \frac{t - b}{a}$$

$$t'_1 = \frac{30 - 0,87}{0,94} = 30,99 \approx t_{w1}$$

$$t'_2 = \frac{46 - 0,87}{0,94} = 48,01 \approx t_{w2}$$

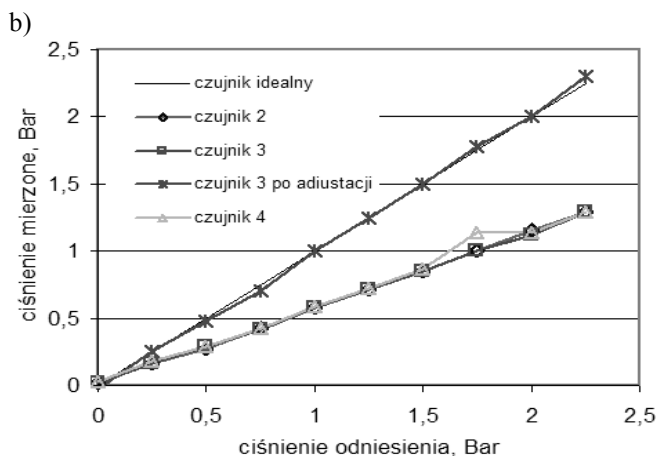
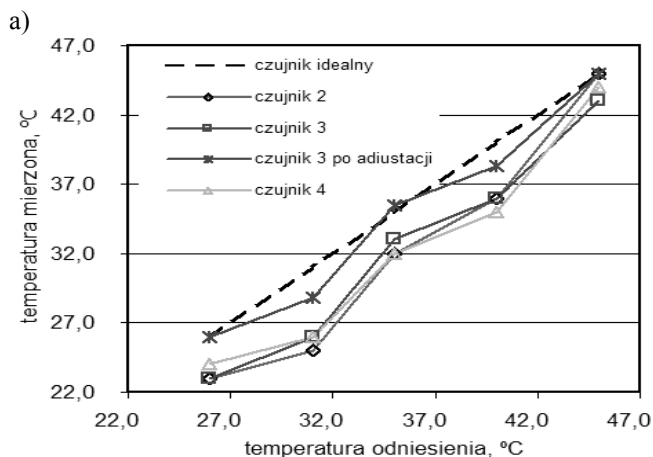
(1)

Wyznacza się je z równania prostej przechodzącej przez dwa dowolne punkty $\{t_1, t_{w1}\}$ i $\{t_2, t_{w2}\}$, przy czym $t_{w1} \neq t_{w2}$, a t_1 i t_2 to wyniki surowe pomiaru temperatury czujnika TPMS umieszczonego wewnątrz koła. Oznaczenie t' odnosi się do wskazania po adiustacji. Przykładowy przebieg obliczeń dla dwóch arbitralnie przyjętych par punktów charakterystyki pomiaru temperatury przedstawiają zależności (1). Po zastosowaniu współczynników poprawkowych a i b wskazania czujnika są porównywalne do wskazań czujnika wzorcowego z akceptowalnym błędem spowodowanym ograniczoną precyzją obliczeń arytmetycznych.

4.3. Wyniki pomiarów i dyskusja

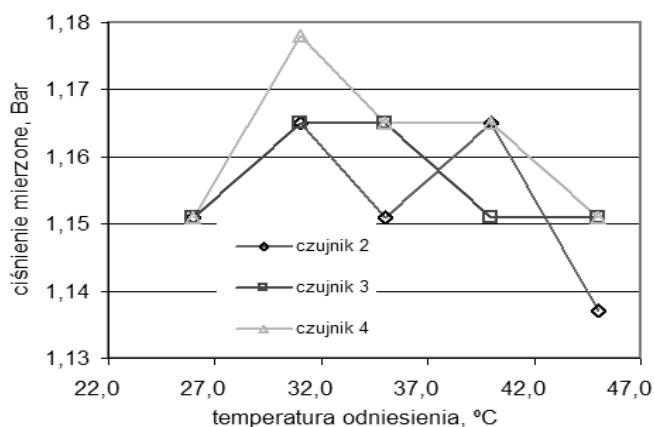
Powyższy sposób adiustacji zastosowano na danych pomiarowych uzyskanych wg punktu A opisanego w podrozdziale 4.1. Wskazania czujników TPMS przed adiustacją porównano ze wskazaniami przyrządów kontrolnych wyznaczając krzywe wzorcowania przedstawione na rysunku 10. Za wartości umownie prawdziwe przyjęto wskazania termometru elektronicznego z czujnikiem półprzewodnikowym i manometru wskazówkowego z rurką Bourdona o przyjętej niepewności akceptowalnej w tym zastosowaniu.

W przypadku temperatury wszystkie 3 czujniki zaniżały pomiar (krzywe leżą poniżej prostej dla czujnika idealnego) - błąd przesunięcia. Adiustację zastosowano przykładowo w odniesieniu do czujnika nr 3, uzyskując zmniejszenie niedokładności pomiaru dla wszystkich punktów pomiarowych, mimo że jego charakterystyka wykazuje nieliniowość. W przypadku pomiaru ciśnienia wykonanego zgodnie z punktem C wystąpił błąd wzmocnienia dla wszystkich trzech czujników. Po adiustacji czujnika nr 3 uzyskano zbliżenie jego wskazań do charakterystyki czujnika wzorcowego. Zwiększenie dokładności pomiaru jest możliwe po zastosowaniu aproksymacji wielomianem wyższego stopnia lub tablicy poprawek w wybranych punktach charakterystyki i interpolację dla wartości pośrednich. Ponieważ zadaniem systemu TPMS jest przede wszystkim ostrzeżenie kierowcy o przekroczeniu progów alarmowych, aproksymacja dwupunktowa wydaje się w tym przypadku wystarczająca.



Rys. 10. Krzywa wzorcowania 3 czujników oraz po adiustacji dwupunktowej dla czujnika nr 3: a) temperatury, b) ciśnienia

Kolejny rysunek, tj. 11, obrazuje zmianę ciśnienia w kole po napompowaniu do wartości nominalnej 2 Barów i nagrzewaniu powietrza zgodnie z opisem z punktu A. W przyjętym zakresie zmian temperatury (symulującym zmianę warunków atmosferycznych) nie zaobserwowano jej wpływu na ciśnienie. Zmiany są nieznaczne i wystąpiły na 3 cyfrze znaczącej. Z punktu widzenia właściwej eksploatacji pojazdu nie ma więc potrzeby uwzględniania wpływu temperatury (w przyjętym zakresie zmian) na wartość ciśnienia w kole.



Rys. 11. Zmiana ciśnienia powietrza wraz ze zmianą temperatury

5. WNIOSKI

Stanowisko stwarza możliwość zapoznania się z elementami systemu TPMS, tj. kontroli ciśnienia i temperatury powietrza w kole samochodowym. Pozwala na nabycie umiejętności z zakresu systemów pomiarowych, programistycznych oraz techniki pomiarowej, sprawdzenia dokładności czujników przez porównywanie z wskazaniem przyrządów kontrolnych, dwupunktową adiustacją odczytów czujników i oszacowanie niepewności pomiaru. Adiustację wskazań czujników można zautomatyzować i umieścić w kodzie programu. Po nieznacznych modyfikacjach program można dostosować do innej platformy sprzętowej z dowolnym procesorem wyposażonym w moduł USART.

6. BIBLIOGRAFIA

1. Strona producenta systemów bezpieczeństwa ZF TRW, <http://www.trw.pl>
2. SAE J3063 Standard - Active Safety Systems Terms & Definitions, SAE International, 2015, p. 7, <http://standards.sae.org>.
3. Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady Wspólnoty Europejskiej nr 661/2009 z dnia 13 lipca 2009 r.: W sprawie wymagań technicznych w zakresie homologacji typu pojazdów silnikowych dotyczących ich bezpieczeństwa ogólnego, ich przyczep oraz przeznaczonych dla nich układów, części i oddzielnych zespołów technicznych, <http://eur-lex.europa.eu>.
4. SAE J2657 Standard - Tire Pressure Monitoring Systems for Light Duty Highway Vehicles, SAE International, 2014, p. 13, <http://standards.sae.org>.
5. Strona firmowa, <http://www.rdks.expert>.
6. Tkacz M.: Stanowisko do bezprzewodowego pomiaru ciśnienia oraz temperatury powietrza w kole samochodu, praca dyplomowa inżynierska, Wydział Elektryczny Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2016.
7. Gancarczyk M.: Aplikacja do komunikacji procesora STM32 z modułem TPMS poprzez interfejs RS232, praca dyplomowa inżynierska, Wydział Elektryczny Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2016.
8. Praca zbiorowa: Czujniki w pojazdach samochodowych. Informator techniczny Bosch, wyd. II rozszerzone, WKiŁ, Warszawa 2014.
9. CRC Calculator, www.zorc.breitbandkatze.de/crc.html.
10. Williams R. N.: A Painless Guide to CRC Error Detection Algorithms, http://www.zlib.net/crc_v3.txt.
11. McGhee J.: Scientific Metrology, ACGM Lodat 1996.
12. Gajda J.: Stan i perspektywy metrologii jako interdyscypliny naukowej (w skali globalnej), Ekspertyza Komitetu Metrologii i Aparatury Naukowej, <http://www.kmian.pan.pl>.

Podziękowanie

Autorzy składają serdeczne podziękowania Dyrekcji oraz Inżynierom Działu Elektroniki Centrum Inżynieryjnego ZF TRW Polska w Częstochowie za przekazanie do badań modułu odbiorczego TPMS wraz z czujnikami, inspirację oraz udzielone wsparcie techniczne.

WIRELESS MEASUREMENT OF PRESSURE AND TEMPERATURE OF AIR INSIDE THE CAR WHEEL

The paper is focused on the issue of teaching metrology. It presents the method of wireless measurement of pressure and temperature of air in a car wheel. For the cognitive and learning purposes it was created an experimental setup to get familiar with the measuring method and elements of Tire Pressure Measurement System. TPMS is one of the modern safety systems used in the automotive industry. Paper describes the construction and operating principle of key elements of setup, i.e. object, integrated sensors, TPMS system, control instruments, the format of data frame transferred between TPMS and computer, CRC codes. Furthermore, there were presented the basic features of two software tools working with Windows based PC computer or embedded system. There was discussed a proposal of carrying out the measurements in simulated conditions with ability to change pressure and also temperature of air inside the wheel using inner heaters. The software for embedded system let to observe raw sensors' readings and additionally adjusted based on a two-point measurements involving control instruments. The adjusting routine was illustrated with an example for better clarity.

Keywords: automotive, driving safety, sensor of the pressure and temperature, TPMS.