

Jarosław JAJCZYK*
Krzysztof MATWIEJCZYK*

DIAGNOSTYKA MAGISTRALI CAN W POJAZDACH

Artykuł zawiera informacje na temat magistrali CAN jako sieci transmisji danych stosowanej w przemyśle motoryzacyjnym do komunikacji pomiędzy poszczególnymi układami sterowania. Przybliżono budowę tego systemu oraz omówiono sposoby przesyłania komunikatów. Zaprezentowano metody umożliwiające wykrycie usterek przy fizycznym uszkodzeniu magistrali CAN.

SŁOWA KLUCZOWE: magistrala danych, diagnostyka, elektronika pojazdowa

1. WSTĘP

Szybki rozwój elektroniki na świecie spowodował, że jest ona również obiektem zainteresowań inżynierów pracujących w koncernach motoryzacyjnych. Jej zastosowanie pozwala na wyposażenie pojazdów w skomplikowane systemy, które zwiększają komfort i bezpieczeństwo jazdy. Na szczególną uwagę zasługują informatyczne sieci komunikacji, które w krótkim czasie stały się podstawowym systemem wymiany danych w pojazdach. Dzięki nim ograniczona została masa własna pojazdów oraz poprzez zastosowanie cyfrowego sygnału poprawiona została jakość transmisji. Najpopularniejszą siecią stosowaną powszechnie przez producentów pojazdów jest magistrala CAN (ang. Controller Area Network). Po raz pierwszy została ona zastosowana przez koncern Mercedesa w 1992 roku a już na początku dwudziestego pierwszego wieku była podstawowym systemem każdego samochodu [1]. Aby ujednoczyć to rozwiązanie, powołana została organizacja CAN in Automation, która opracowała standardy związane z magistralą CAN. Wprowadziła ona obowiązującą normę europejską ISO 11898, która odpowiada amerykańskiej normie SAE J1939 i opisuje warstwę fizyczną systemu CAN oraz warstwę aplikacji [4, 5, 10].

Magistrala CAN jest odpowiedzią na zwiększającą się liczbę czujników, sterowników oraz elementów wykonawczych w pojazdach. Mnogość systemów w jakie zostały wyposażone samochody utrudnia przejrzystą wymianę danych, stąd też podzespoły grupuje się np. w systemy oświetlenia, nadwozia, napędu itd. W pojazdach znajduje się więcej niż jedna magistrala CAN, a dane są często

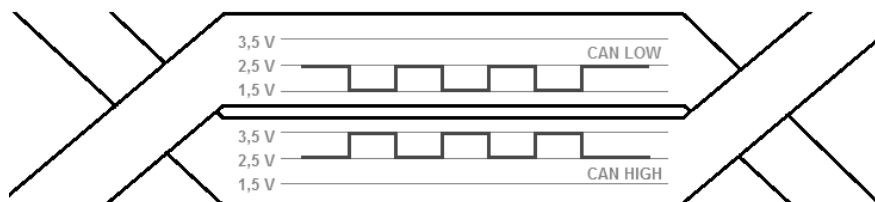
* Politechnika Poznańska.

przesyłane pomiędzy poszczególnymi systemami. Oprócz międzywęzłowej wymiany danych tego typu sieć pozwala na sprawną diagnostykę usterek. Elektroniczne sterowniki poszczególnych systemów monitorują swoją pracę a każda niezgodność zapisywana jest w pamięci w postaci kodu symbolizującego określoną usterkę. Poprzez podłączenie interfejsu diagnostycznego przez złącze OBD kody te są odczytywane a następnie dekodowane [3, 4].

2. BUDOWA MAGISTRALI CAN

Magistrala CAN pozwala łączyć między sobą urządzenia poprzez trzy topologie: liniową, pierścieniową oraz gwiazdową. Ze względów technicznych powszechnie stosowana jest struktura liniowa, która mimo uszkodzeń poszczególnych węzłów zapewnia ciągłą wymianę danych.

Warstwa fizyczna magistrali CAN składa się z dwuprzewodowej skrętki łączącej wszystkie nadajniki i odbiorniki. Na obu końcach skrętki montowane są rezystory zwane termistorami, których zadaniem jest zapobieganie zjawisku odbicia się fali elektromagnetycznej. Dane przesyłane są w postaci sygnału różnicowego [9, 10]. Zasadę jego tworzenia przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Transmisja sygnału w skrętce CAN

Skrętka magistrali składa się z dwóch przewodów oznaczanych jako CAN_L (niska magistrala CAN) oraz CAN_H (wysoka magistrala CAN). Kiedy występuje bit recesywny w obu przypadkach jest taka sama wartość napięcia, która wynosi 2,5 V. Stan dominujący odzwierciedlają następujące potencjały: dla CAN L – 1,5 V, zaś dla CAN_H – 3,5 V. W stanie dominującym różnica napięć jest na poziomie ok. 2 V (rys. 1). Ewentualne zakłócenia działające na skrętkę znoszą się, przez co zachowana zostaje wysoka jakość transmisji danych.

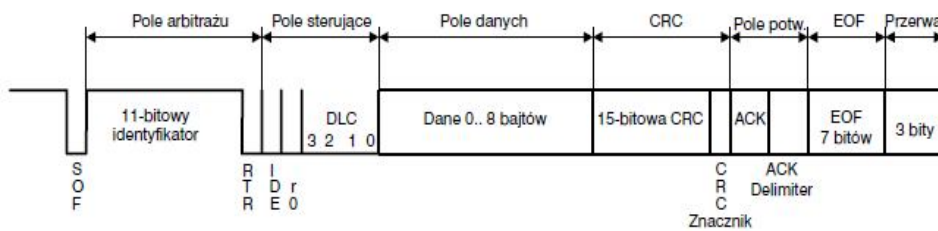
Długość przewodów magistrali ma znaczenie i wpływa na jakość transmisji. Maksymalna długość magistrali l_{max} na etapie projektowania wyznaczana jest za pomocą zależności (1) [4].

$$l_{max} = \frac{C_{Cu}}{V_t} \quad (1)$$

gdzie: V_t – szybkość transmisji, C_{Cu} – prędkość rozchodzenia się sygnału w miedzi ($C_{Cu} = 2 \cdot 10^8$ m/s).

Zgodnie z normą ISO 11898 zaleca się, aby długość magistrali nie przekraczała 40 m (ma to sens ze względu na budowę i rozmiary pojazdów) [6, 7, 8].

Warstwa łącza danych odpowiada za nadawanie adresu urządzeniom, który pozwala odbierać komunikaty wysyłane w postaci ramek danych (rys. 2).

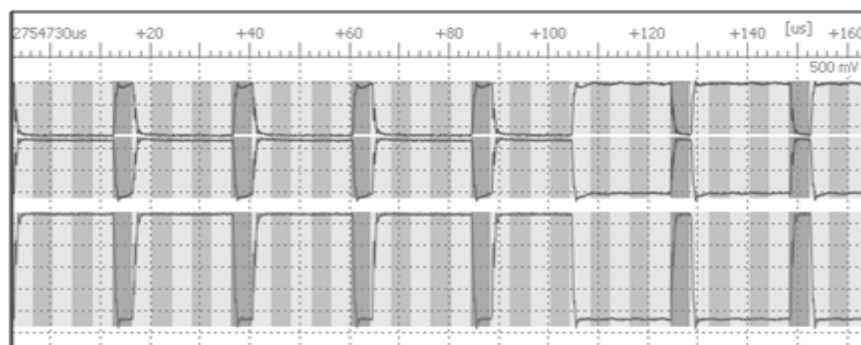


Rys. 2. Struktura ramki standardu CAN [1]

Komunikat składa się z [2, 5, 10]:

- pola/bitu startowego (SOF) – rozpoczyna nadawaną ramkę; jego wartość jest zawsze dominująca,
- pola statusu (identyfikator wiadomości) – określa priorytet komunikatu i w zależności od przyjętego standardu CAN może składać się z 11 bitów (CAN2.0A) lub 29 bitów (CAN2.0B),
- pola sterującego – informuje o standardzie CAN, jaki został przyjęty oraz zawiera informację o długości kolejnego pola ramki (pola danych),
- pola danych – maksymalnie 8 bajtów w których zawiera się główna informacja przesyłana w komunikacie,
- pola zabezpieczenia – odpowiada za wykrywanie zakłóceń transmisji na podstawie sumy kontrolnej CRC, która jest tworzona przez nadawnik i zapisywana w tym miejscu; przy odbiorze ramki odbiornik tworzy drugą taką sumę i porównuje jej wartość z tą zawartą w polu zabezpieczenia,
- pola potwierdzenia (ACK) – dwubitowe pole zawierające informację zwrotną nadaną przez odbiornik o potwierdzeniu odebranej ramki,
- pola końcowego (EOF) – siedem bitów o wartości recesywnej, które kończy ramkę danych.

Każdy komunikat zawiera również 3-4 bity separujące, które oddzielają między sobą poszczególne ramki. W poprawnie nadawanej ramce nie powinno być sześciu kolejnych bitów o tej samej wartości logicznej. Gdy sterownik wyśle ciąg równych bitów, tranceiver dopisuje dodatkowy bit po pięciu tych samych wartościach. Odbiornik pomija ten bit przy dekodowaniu komunikatu. Ciąg tego typu bitów nazywa się bitami odstępowymi [3, 10]. Rysunek 3 przedstawia część ramki z podziałem na bity. Obszary zacieniowane to bity dopisane.



Rys. 3. Ciąg bitów z wyszczególnionymi bitami odstępowymi

Ostatnią warstwą standardu CAN jest warstwa aplikacji, która nie została określona w żadnych dokumentach prawnych. Przez to, że nie narzucono na tę część żadnych ograniczeń, koncerny samochodowe zbudowały własne protokoły, które ze względów polityki prywatności są utajone. Przykładem tego typu danych są m.in. protokoły sterujące modułami we współczesnych pojazdach.

3. KOMUNIKACJA W MAGISTRALI CAN

Urządzenia sterujące i wykonawcze nie mogą być bezpośrednio wpięte do magistrali CAN, ponieważ nie są przystosowane do odbierania i nadawania danych. Aby zapewniona była wymiana informacji, każde z nich musi być wyposażone w dodatkowe układy elektroniczne. W jego skład wchodzi: mikrokontroler, procesor CAN oraz transceiver.

Mikrokontroler odbiera sygnał i przekazuje go w postaci danych do kontrolera CAN. Tworzona jest typowa ramka CAN zawierająca dane. Jej wysyłanie jest realizowane za pomocą transceivera, który stanowi układ nadający lub odbierający komunikaty. Układy odbierające pozostałych sterowników pobierają dane z magistrali, które przekazują do kontrolerów CAN, gdzie na podstawie identyfikatora odbywa się weryfikacja, czy dany komunikat adresowany był do danego węzła. Jeżeli wiadomość zostanie przyjęta jest ona dalej przetwarzana. Podmieniany jest bit pola potwierdzenia z wartości dominującej na recesywną i odsyłany z powrotem jako rodzaj raportu doręczenia komunikatu dla nadawcy. W pozostałych przypadkach, gdy identyfikator nie zostanie zaakceptowany, odbiór danych jest przerywany [2, 5, 6].

Podstawową metodą dostępu do magistrali jest metoda CSMA/CA – wielostacyjny dostęp do informacji. Urządzenie nadaje informację tak długo, dopóki zapis jej jest zgodny z sekwencją bitów obecnych w magistrali. Jeżeli wysłany zostanie bit recesywny, natomiast sygnał główny będzie miał w tym

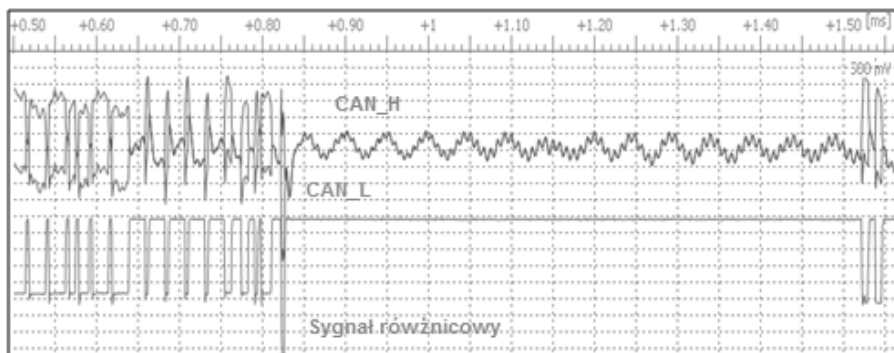
momencie wartość równą logicznemu zeru (bit dominujący), dany węzeł przerywa nadawanie i przechodzi w stan odbioru informacji.

Odpowiedzialny za poprawne funkcjonowanie transmisji jest proces arbitrażu, w którym na podstawie identyfikatora ramek nadawany jest priorytet komunikatu. Korzysta się w nim z tzw. metody operacji logicznej „Wired-And”, która polega na nadpisywaniu bitów recesywnych przez bity dominujące. Przebieg arbitrażu gwarantuje, że żaden bit nie jest tracony, a przy tym nie wydłuża się czas nadawania komunikatu [4, 10].

Magistrala CAN jest siecią informatyczną o wysokiej niezawodności. Aby jednak móc na bieżąco kontrolować połączenia oraz wymianę danych, stosuje się systemy wykrywania i korekcji błędów. Informacja o błędzie jest przesyłana najpóźniej pod koniec komunikatu, aby układ nadający mógł powtórzyć wysłanie ramki danych. Wśród metod detekcji błędów wyróżniono [1, 4, 9, 10]:

- kontrola nadmiarowa CRC – wykrywanie błędu poprzez porównanie sumy kontrolnej na końcu transmisji w układzie odbierającym komunikat z jej wartością początkową w układzie nadawczym,
- sprawdzanie formatu ramki – sprawdzenie poszczególnych pól komunikatu, czy na pewno ich wartości logiczne są zgodne z tymi określonymi w protokole CAN; kontroli podlega struktura komunikatu,
- błąd potwierdzenia – brak komunikatu zwrotnego z układu odbiorczego, który informuje nadawcę o poprawnym przebiegu transmisji,
- błąd synchronizacji danych - monitorowanie poprawności kodu ramki zgodnie z regułą, że maksymalnie pięć kolejnych bitów może mieć tę samą wartość logiczną.

Po wykryciu błędu kontroler CAN przerywa wysyłanie ramki danych. Nadawana jest wtedy tzw. ramka błędu. Jest to sześć kolejnych bitów dominujących (active error flag) lub recesywnych (passive error flag). Sytuacja ta pokazana została na rysunku 4, gdzie od chwili 0,83 ms przerwana została transmisja i nadano ramkę błędu.



Rys. 4. Przebieg sygnałów w magistrali CAN podczas nadania ramki błędu

Nadajnik, któremu przerwano wysyłanie ramki, spróbuje wznowić proces transmisji później, aby inne węzły magistrali przez przypadek nie odebrały błędnych informacji. Po sześciu bitach dominujących następuje osiem bitów recesywnych, które są traktowane jako odstęp po ramce błędu.

4. DIAGNOSTYKA MAGISTRALI CAN

Magistrala CAN nie służy jedynie do wymiany informacji pomiędzy przyłączonym do niej urządzeniami. Istnieje możliwość przyłączenia złącza diagnostycznego standardu OBD, przez które za pomocą zewnętrznych interfejsów diagnostycznych można odczytywać parametry poszczególnych układów oraz informacje o zaistniałych błędach. Poprawne funkcjonowanie układu wymaga, aby magistrala nie posiadała żadnych uszkodzeń mechanicznych. Norma ISO 11898 opisuje m.in. usterki mechaniczne magistrali CAN, które mogą powstać w trakcie eksploatacji pojazdów:

- przerwany przewód CAN_H lub CAN_L,
- przewód CAN_H lub CAN_L zwarty do źródła napięcia,
- przewód CAN_H lub CAN_L zwarty do masy,
- zwarcie między przewodami magistrali – CAN_H z CAN_L,
- przerwanie któregoś z przewodów magistrali,
- uszkodzenie rezystora krańcowego magistrali.

W celu diagnozy jednej z powyższych usterek stosuje się specjalne interfejsy wyposażone w odpowiednie oprogramowanie. Po ich podłączeniu do magistrali odczytuje się sygnały wysyłanych ramek i na ich podstawie określa typ usterki. Należy w tych przypadkach postępować według następującej strategii [3, 9]:

- 1) Sprawdzenie magistrali transmisji danych za pomocą testera bądź interfejsu komputerowego.
- 2) Zapoznanie się z budową całego systemu w badanym samochodzie, a następnie dokonanie pomiarów sieci multimetrem bądź oscyloskopem.
- 3) Naprawa uszkodzonego przewodu bądź wymiana sterownika z wadliwym złączem, a po przywróceniu sprawności magistrali wykasowanie błęd z pamięci rejestru i ponowne sprawdzenie systemu.

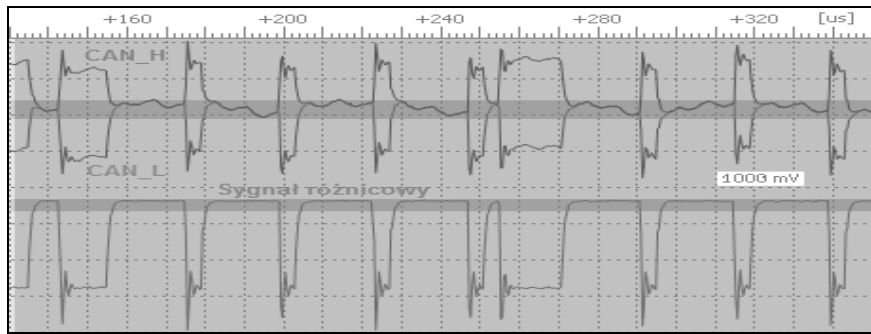
W pracy zostały przeprowadzone badania magistrali odpowiedzialnej za systemy silnika i napędu (przepustowość 250 kb/s). Pojazdem, na którym przeprowadzono opisywane doświadczenia, był autobus marki Solaris Urbino U18 z silnikiem gazowym CNG. Jako sprzęt diagnostyczny użyto oscyloskopu PicoScope 3200, posiadającego dwa kanały analogowe oraz szesnaście cyfrowych.

Zasymulowano następujące usterki:

- a) Brak rezystora dopasowującego

Na oscylogramie zamieszczonym na rysunku 5 zauważyć można duże oscylacje przy zboczu narastającym sygnału wysokiego i opadającym sygnału niskiego.

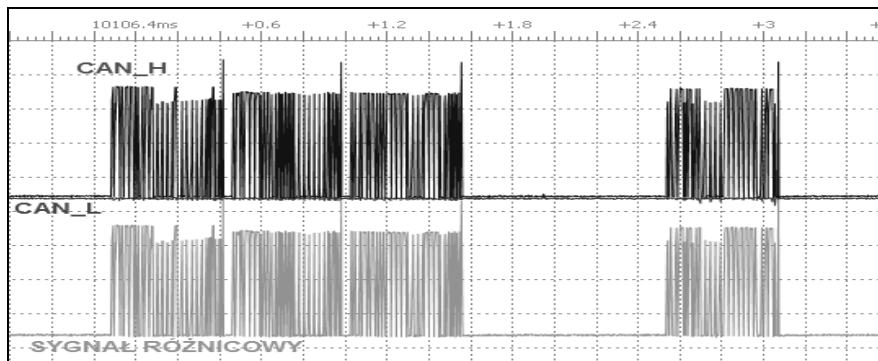
Przekłada się to na zaburzenia sygnału różnicowego. Ciąg bitów stanu niskiego na poszczególnych przewodach odbiega od linii prostej prostej.



Rys. 5. Transmisja danych w magistrali CAN przy wypiętym rezystorze krańcowym

b) Zwarcie przewodu CAN_L z masą

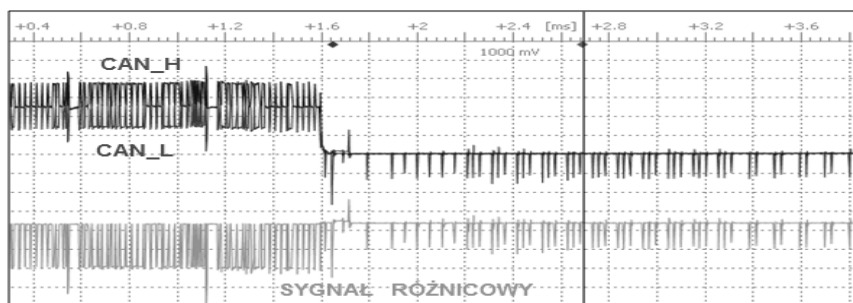
W tym przypadku napięcie na przewodzie CAN_L wynosi 0 V. Sygnałem na magistrali jest przebieg z przewodu CAN_H. Magistrala nie przestaje działać, a jedynie przechodzi w tryb jedнопроводowy (rys. 6).



Rys. 6. Przebieg sygnałów w magistrali CAN podczas zwarcia przewodu CAN_L do masy

c) Zwarcie przewodu CAN_H z masą

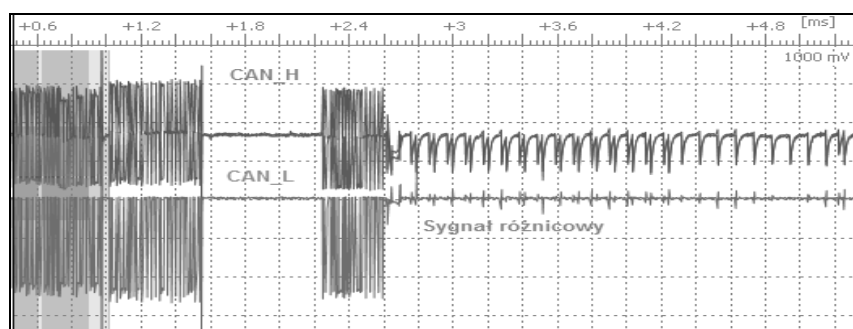
W chwili wystąpienia zwarcia sygnał w przewodzie CAN_H zanika, a napięcie w przewodzie spada do 0 V. W przewodzie CAN_L pojawiają się pojedyncze piki, które oznaczają próbę rozpoczęcia nadawania (rys. 7). Przesył danych w takim przypadku nie jest możliwy, a sieć CAN przestaje pracować poprawnie (począwszy od 1,6 ms – rys. 7). Praca jedнопроводowa w tym przypadku jest niemożliwa). Stanowi to zabezpieczenie systemowe, aby sygnał różnicowy ($U_{CAN_H} - U_{CAN_L}$) nie przyjmował ujemnych wartości napięcia.



Rys. 7. Przebieg sygnałów w magistrali CAN podczas zwarcie przewodu CAN_H do masy

d) Zwarcie przewodu CAN_H z CAN_L

W początkowej chwili zauważalne są mocne oscylacje, po których napięcia w przewodach magistrali wyrównują się na poziomie 2,5 V. Pojawia się szereg oscylacji, które deformują komunikaty (rys. 8).



Rys. 8. Zwarcie między przewodami skrętki magistrali CAN

Początkowo występuje próba nadania komunikatu, jednak od momentu zwarcia (2,6 ms) sygnały z obu przewodów pokrywają się ze sobą. Sygnał różnicowy nie występuje o czym świadczy jego wartość równa 0 V. W przypadku tego typu zwarcia magistrala CAN przestaje funkcjonować.

e) Zwarcie przewodu CAN_L lub CAN_H z plusem zasilania

W tego typu uszkodzeniach magistrala CAN przechodzi w jedнопrzewodowy tryb pracy. Napięcie na przewodzie zwartym z plusem zasilania wynosi 12 V lub 5 V. W takich sytuacjach istnieje możliwość uszkodzenia układów elektronicznych.

f) Przerwanie któregoś z przewodów magistrali

W tym przypadku występuje otwarty obwód jednego przewodu, co oznacza, że magistrala CAN przechodzi w tryb pracy jedнопrzewodowej. Sygnał magistrali odpowiada przebiegowi na nieuszkodzonej żyłce skrętki. Określenie tego typu usterek nie wymaga zaawansowanej techniki. Każdy producent aut posiada odpowiedni kod usterki, który jest odczytywany poprzez tester diagnostyczny.

5. WNIOSKI

Magistrala CAN to uniwersalny system, który pozwala na integrację wielu urządzeń przy wykorzystaniu wspólnego medium transmisyjnego. Dzięki dwuprzewodowej skrętce i cyfrowemu sygnałowi różnicowemu otrzymuje się wysoką jakość przesyłu. Ważne jest zapoznanie się z zachowaniem magistrali w przypadku uszkodzeń mechanicznych. Tego typu awarie nie są precyzyjnie rozpoznawane przez testery diagnostyczne, dlatego też do weryfikacji miejsca uszkodzenia magistrali CAN używane są multimetry oraz oscyloskopy.

Przeprowadzone w pracy badania symulacyjne miały na celu przedstawienie przebiegów napięciowych występujących podczas zaistnienia usterki. Przebieg sygnału różnicowego występuje zawsze, kiedy magistrala jest w trybie pracy dwu lub jednoprzewodowym. Ten drugi tryb odzwierciedla stan awaryjny sieci, który pozwala utrzymać transmisję. Przy projektowaniu magistrali CAN należy przestrzegać norm oraz brać pod uwagę rozmieszczenie instalacji w pojeździe w celu uniknięcia ewentualnych usterek mechanicznych.

LITERATURA

- [1] Czasopismo *Elektronika dla wszystkich*, s. 97-100, czerwiec 2000.
- [2] Estchberger K., *Controller Area Network*, Wyd. 3. Hanser Verlag 2006.
- [3] Frei Martin, *Samochodowe magistrale danych w praktyce warsztatowej*, Wydanie 1 WKŁ Warszawa 2010.
- [4] Fryskowski B., Grzejszczyk E., *Systemy transmisji danych*, Wydanie 1 WKŁ Warszawa 2010.
- [5] Informator techniczny Robert Bosch GmbH, *Sieci wymiany danych w pojazdach samochodowych*, Wydanie 1, Warszawa 2008.
- [6] ISO 11898-1:2003 *Road vehicle – Controller area network (CAN) – Part 1: Data link layer and physical signaling*.
- [7] ISO 11898-2:2003 *Road vehicle – Controller area network (CAN) – Part 2: High speed medium access unit*.
- [8] ISO 11898-1:2003 *Road vehicle – Controller area network (CAN) – Part 3: Low speed, fault-tolerant, medium-dependent interface*.
- [9] Materiały udostępnione przez Politechnikę Łódzką www.dsod.pl, 29.10.2013.
- [10] Zimmermann W., Schmidgall R., *Magistrale danych w pojazdach. Protokoły i standard*, Wydanie 1 WKŁ Warszawa 2008.

DIAGNOSTICS OF CAN BUS IN VEHICLES

This paper presents more information about CAN Bus System as data transmission network used in automotive industry for communication between other systems. It also describes the elaborated structure and how to create control messages which come from drivers sent by CAN Bus System. This paper also contains ways of searching mechanical faults when bus is broken.