

EVOLUTION OF DATA EXCHANGE IN ON-BOARD VEHICLES SYSTEMS

EWOLUCJA WYMIANY DANYCH W SYSTEMACH POKŁADOWYCH POJAZDÓW

Marcin Wawrzyński

Warsaw University of Technology, Department of Transport
Politechnika Warszawska, Wydział Transportu

Abstract: *On-board data exchange systems evolve with the development of vehicles. These are specialized constructions created from scratch to meet the specific tasks of modern control systems. The article presents the basic milestones in the evolution of telecommunications buses in vehicles from the beginning of their creation to the present day with the identification of areas that are the starting point in new directions of their development.*

Keywords: *CAN bus, FlexRay, LIN*

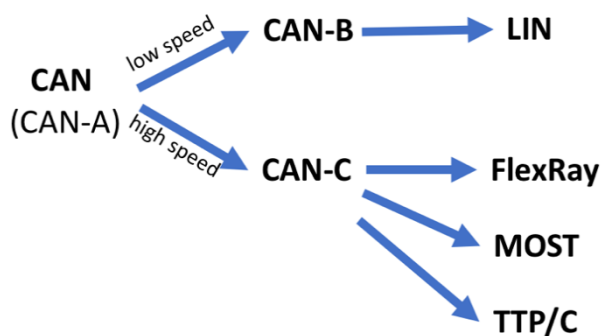
Streszczenie: *Pokładowe systemy wymiany danych ewoluują wraz z rozwojem środków transportu. Stanowią one specjalizowane konstrukcje stworzone od podstaw w celu spełnienia specyficznych zadań jakie stawiają przed nimi nowoczesne układy sterowania. W artykule przedstawiono podstawowe kroki milowe w ewolucji magistral telekomunikacyjnych w pojazdach od początku ich powstania po dzień dzisiejszy z zaznaczeniem obszarów, które stanowią punkt wyjścia w nowych kierunkach ich rozwoju.*

Słowa kluczowe: *magistrala CAN, FlexRay, LIN*

1. Wstęp

Systemy Na początku lat osiemdziesiątych ubiegłego wieku trwały intensywne prace nad elektronicznym sterowaniem samochodowych silników spalinowych. Chodziło o to, aby wyeliminować układy mechaniczne, których zdolności regulacyjne okazały się zbyt mało precyzyjne wobec rosnących potrzeb dokładności sterowania. Głównym bodźcem dla wiodących producentów samochodów było dostosowanie konstrukcji do wprowadzonych zastrzeżeń norm emisyjnych w Stanach Zjednoczonych oraz związana z tym konieczność zastosowania katalizatorów [1]. Oznaczało to definitywny koniec stosowania gaźników, których błąd regulacyjny doprowadzał do przedwczesnego uszkodzenia katalizatora. Jednocześnie w świecie automatyki przemysłowej był to czas intensywnego rozwoju automatycznych linii produkcyjnych oraz związanego z tym powstania protokołów komunikacyjnych zdolnych synchronizować pracę automatów. Czołowi producenci wprowadzili do produkcji sterowniki wyposażone w interfejsy szeregowo posiadające takie protokoły jak PROFIBUS, INTERBUS czy Sercos [2].

W przemyśle samochodowym natomiast opracowano jednostkę sterującą pracą silnika ECU (Electronic Control Unit) co otworzyło drogę do powstania protokołu zdolnego niezawodnie i bezpiecznie wymieniać dane pomiędzy sensorami i aktuatorami. Był to moment narodzin systemów magistralowych w pojazdach. Systemów których kolejne mutacje wytrzymały próbę czasu. Choć od tamtej pory w rozwoju motoryzacji oraz tym bardziej w elektronice minęła cała epoka, to istota koncepcji powstałej w latach osiemdziesiątych dalej obowiązuje. Niemniej daje się zauważyć presję na doskonalenie systemów sterowania i przekazu informacji w magistralach pojazdowych co zmusza do refleksji nad tym, jak te nowe wyzwania znajdują odzwierciedlenie w technicznej rzeczywistości (rys.1).



Rys.1 Ewolucja systemów magistralowych stosowanych w pojazdach
(źródło własne)

2. Transmisja zorientowana na rodzaj komunikatu

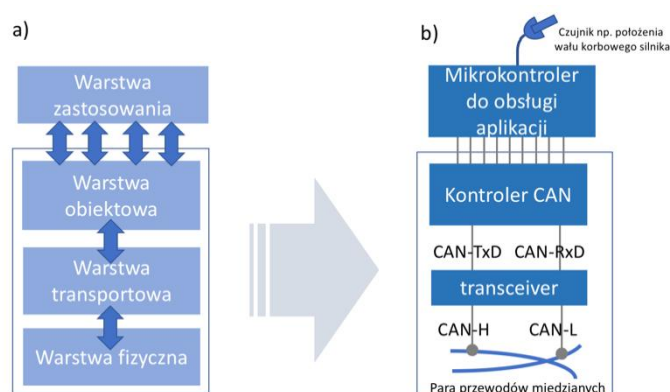
Standard interfejsu komunikacyjnego dedykowanego pojazdom opracowano w firmie Bosch [3]. W początkowej fazie starano się zastosować któryś z rozwijanych wówczas standardów przemysłowych. Jednak architektura systemu magistralowego w pojeździe znacząco różni się od typowej architektury klient – serwer (Master - Slave) systemu automatyki przemysłowej. W porównaniu do niej w pojeździe na pierwszy rzut oka architektura informacyjna zdaje się być zupełnie nieuporządkowana. Występują tam różne systemy: hamulcowy, wyposażenia bezpieczeństwa, wyposażenia kabiny, sterowania silnikiem, sterowania napędem i inne posiadające różne wzajemne relacje oraz dodatkowo każdy z nich może być wzbogacany w kolejne urządzenia w zależności od żądań zamawiającego. Przy czym dodane w ten sposób elementy opcjonalne nie mogą powodować konieczności rekonfiguracji pozostałych urządzeń.

Cecha ta zaważyła na odejściu od obowiązującej w automatyce przemysłowej koncepcji adresowania samych urządzeń, co w realiach produkcji wielkoseryjnej umożliwiło ograniczenie różnorodności wersji tego samego urządzenia związanej z różną adresacją. W zamian postanowiono nadać identyfikatory rodzajom komunikatów, które mogą być wysyłane do magistrali pojazdu przez podłączone do niej urządzenia. Wybór tej logiki umożliwił łatwą rozbudowę o kolejne elementy wyposażenia, które przy tym podejściu mogą wysyłać swoje komunikaty do sieci nie dbając o adresowanie. Każdy odbiorca ma dostęp do każdej wiadomości, lecz subskrybuje się jedynie do interesującego go identyfikatora wiadomości, a nie do adresu nadawcy. Metoda ta okazała się być doskonałym rozwiązaniem problemu niedookreślenia docelowej architektury, gdyż przyjęty rozmiar identyfikatora komunikatu wynoszący 11 bitów dla CAN2.0A pozwala na wysyłanie 2048 rodzajów wiadomości, przy czym dla standardu CAN2.0B jest to już liczba 536 milionów rodzajów wiadomości co wydaje się być nie do zagospodarowania [4].

Dodatkowo metoda rozgłaszania komunikatów nie ogranicza w żaden sposób możliwości rozbudowy układów magistralowych o nowe elementy opcjonalne wyposażenia pojazdu. Na przykład dodanie czujnika zmierzchowego w celu automatycznego włączania/wyłączania oświetlenia nie powoduje konieczności wymiany innych elementów układu sterowania oświetleniem. Czujnik zmierzchu wysyła informację na temat aktualnego natężenia oświetlenia do magistrali, gdzie być może zostanie ona odczytana przez zainteresowanego nią subskrybenta informacji. Zatem zorientowanie komunikacji na rodzaj wiadomości i odejście od adresacji węzłów sieci to jedna z podstawowych cech układu magistralowego leżąca u podstaw opublikowania w 1986 roku standardu CAN (Controller Area Network) co skutkowało pierwszym układem scalonym 82526 wyprodukowanym przez firmę Intel rok później [3].

3. Wymagania funkcjonalne i niezawodnościowe magistrali CAN

Już od samego początku obok opisanej wyżej elastyczności głównym dążeniem konstruktorów standardu CAN było zapewnienie niezawodności funkcjonowania przy jednoczesnym uproszczeniu wiązki elektrycznej pojazdu. Pogodzenie sprzecznych oczekiwań musiało skutkować poszukiwaniem rozwiązania jednocześnie na kilku warstwach stosu protokołów.



Rys. 2 Stos protokołu dla systemu magistralowego CAN (źródło własne)
a) widok warstw logicznych
b) funkcje urządzeń realizujących zadania poszczególnych warstw

Detekcja uszkodzenia linii

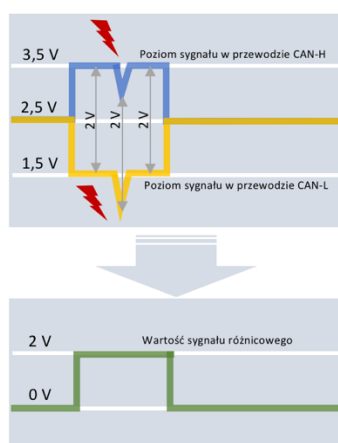
W warstwie fizycznej zaproponowano wykorzystanie pary wzajemnie skręconych przewodów miedzianych oznaczonych jako CAN-H i CAN-L. W celu ułatwienia ewentualnych napraw oba przewody tej samej magistrali, dla rozróżnienia wśród innych magistral oznaczone są wspólnym kolorem izolacji. Początkowa realizacja standardu CAN zakładała wartość recesywną napięcia w przewodach, a więc wartość napięcia w stanie oczekiwania na komunikację, na poziomie 0V dla przewodu CAN-H. Biorąc pod uwagę możliwe rodzaje uszkodzenia linii, a więc przerwanie przewodu pomiędzy kontrolerami lub zwarcie ich do masy pojazdu pomysł ten w praktyce warsztatowej okazał się niezbyt szczęśliwy, utrudniając diagnostykę uszkodzeń [5].

W opracowanej później wersji protokołu CAN (rys.1) w czasie oczekiwania na komunikację w obu przewodach występuje recesywna wartość napięcia 2,5V dla standardu High-Speed CAN. Umożliwia to automatyczne rozpoznanie fizycznej ciągłości połączenia pomiędzy kontrolerami oraz detekcję przypadków zwarcia wiązki elektrycznej do masy pojazdu. Uznano bowiem, że w takim przypadku oczekiwanym efektem będzie ciągła wartość 0V na jednej i/lub drugiej żyły zarówno, kiedy przewód jest przerywany jak i zwarty do masy pojazdu i będzie to odczytywane przez kontroler CAN jako niezdatność układu.

Wówczas linia jest częściowo lub w przypadku otrzymania napięcia 0V na obu przewodach, całkowicie niezdatna. Dzięki takiemu ustaleniu poziomów napięć uniknięto wysyłania komunikatów do nikąd umożliwiając tym samym detekcję uszkodzenia i zapisanie błędu magistrali w kontrolerze. Natomiast wartość dominującą sygnału, czyli niosącą wartość informacyjną, oznaczono odpowiednio wzrostem napięcia na przewodzie CAN-H do poziomu 3,5V oraz spadkiem na CAN-L do 1,5V. Pomysł ten jest efektem udoskonalenia kolejnych wersji standardu CAN i stanowi o prostocie wstępnej diagnostyki magistrali i jest wykorzystywany na co dzień w praktyce warsztatowej [8].

Odporność na zakłócenia

W obu standardach CAN użyto różnicowego systemu transmisji sygnału. Powoduje to wzrost odporności na zakłócenia. Indukowane napięcie oddziałujące podobnie na oba przewody zachowując wzajemną relację napięć CAN-H i CAN-L co pozwala odbiornikowi bezbłędnie odczytywać prawidłową wartość sygnału nawet w warunkach silnych zakłóceń (rys.2).



Rys. 3 Zastosowanie transmisji różnicowej w celu odfiltrowania zakłóceń
(źródło własne)

Zaplanowaną konsekwencją nadmiarowości warstwy fizycznej magistrali CAN jest odporność na utratę jednego z dwóch przewodów magistrali. Cechą warstwy transportowej protokołu CAN (rys.2) jest to, że system może wówczas pracować na jednym z nich zamykając obwód z wykorzystaniem połączenia do masy pojazdu na obu końcach, po stronie nadajnika i odbiornika. W takiej sytuacji w większości pojazdów kierowca nie zostanie nawet poinformowany o częściowej niezdatności układu, gdyż nie wiążą się z tym żadne bieżące konsekwencje dla eksploatacji. Przy tej okazji warto wspomnieć, że niezawodne połączenie sterownika do wspólnej masy okazuje się w tej sytuacji nieodzowne.

Praca w układzie multi-master

Układ magistralowy CAN umożliwia pracę wszystkich podłączonych urządzeń bez udziału centralnej jednostki sterującej, czyli inaczej niż ma to zazwyczaj miejsce w typowych układach automatyki przemysłowej [2]. Dzięki zastosowaniu systemu multi-master uniknięto możliwości paraliżującego pracę uszkodzenia jednego, centralnego elementu sieci. Zatem równouprawnienie w dostępie oraz opisane powyżej adresowanie zorientowane na rodzaj komunikatu przy jednoczesnym braku określania adresu odbiorcy oznaczają dla magistrali wyższą niezawodność. Każdy pojedynczy kontroler może doznać uszkodzenia pozostającego bez wpływu na działanie pozostałych urządzeń, gdyż efektem tego będzie co najwyżej brak odsłuchania lub też brak nadania określonego rodzaju komunikatu.

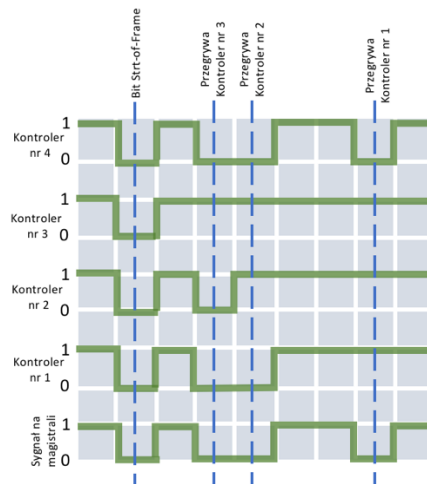
Jednakże, aby umożliwić ww. zwiększenie niezawodności wprowadzając równouprawnienie dostępu konieczne jest zastosowanie mechanizmu arbitrażu w warstwie obiektowej protokołu (rys.2).

Jednym z najbardziej udanych i jak się wydaje wciąż niezastąpionych rozwiązań stanowiących o skuteczności magistrali CAN jest nieniszczący arbitraż dostępu do magistrali. Cecha ta oznacza, że umożliwia on jednoczesne nadawanie do magistrali tylko jednego, wybranego komunikatu bez straty czasu i utraty danych w przypadku wystąpienia konfliktu dostępu do magistrali. Sformułowanie „nieniszczący” trafnie oddaje najważniejszą cechę tego rozwiązania, bowiem pomimo jednoczesnego rozpoczęcia nadawania kilku komunikatów do magistrali jedynie komunikat o najwyższej wadze zostanie w pełni tzn. do końca, nadany. Pozostałe komunikaty po przegraniu rywalizacji o dostęp do magistrali zmuszone są przystąpić do arbitrażu ponownie, oczekując na swoją kolej w buforze kontrolera CAN (rys.1b).

Przedstawiony na rysunku 3 nieniszczący arbitraż na podstawie analizy wartości bitów polega na wykorzystaniu metody operacji logicznej AND na wspólnym drucie.

Kiedy magistrala znajduje się w stanie recesywnym, czyli mówiąc prościej jest wolna, wówczas wszystkie kontrolery CAN, które wcześniej otrzymały do swojego buforu nadawczego komunikat przeznaczony do nadania wysyłają na magistralę bit dominujący zwany Start-of-Frame. Po nim następuje wysłanie ciągu bitów stanowiących identyfikator komunikatu i właśnie na podstawie kolejnych jego bitów wykonywany jest arbitraż. Wygrywa go stacja, której komunikat ma mniejszą wartość identyfikatora wiadomości traktowanego jako liczba binarna. Dzieje się to bez strat dla stacji przegrywającej arbitraż, gdyż bity reprezentowane jako sygnał dominujący nadpisują bity reprezentowane przez sygnał recesywny wysyłane przez inne stacje. Zatem każdy kontroler, który ma wiadomość do wysłania wysyła ją bit po bicie zaczynając od identyfikatora komunikatu, począwszy od bitu najbardziej znaczącego. Każdy kontroler podczas nadawania każdego bitu porównuje jednocześnie wartość odczytaną w tym samym czasie na magistrali.

Jeżeli stwierdzi, że pomimo nadania sygnału recesywnego w magistrali nadawany jest sygnał dominujący oznacza to, że przegrał arbitraż i inna stacja nadaje dalej wiadomość o wyższym priorytecie (niższej wartości identyfikatora) wobec czego należy zakończyć nadawanie.



Rys. 4 Nieniszczący arbitraż dostępu do magistrali CAN (źródło własne)
 1- poziom recesywny, 0 – poziom dominujący.
 Kontroler nr 4 wygrał arbitraż

Niedeterministyczny czas oczekiwania na transmisję

Dzięki metodzie arbitrażu komunikaty o niższym priorytecie muszą jedynie odczekać do kolejnej próby nadawania co oznacza w praktyce do 150 okresów bitów dla standardu CAN Low-Speed co przy szybkości transmisji danych 500 kbit/s wynosi 300µs. Oczywiście jest zatem, że niepewność otrzymania komunikatu wzrasta wraz ze wzrostem natłoku komunikatów w magistrali. Wtedy to prawdopodobieństwo pojawienia się komunikatów o wyższym priorytecie wzrasta, wobec czego czas oczekiwania może również wzrosnąć. W tych okolicznościach można stwierdzić ogólnie, że czas oczekiwania na nadawanie w magistrali CAN jest niedeterministyczny. Prawdopodobieństwo pojawienia się komunikatów o wyższym priorytecie jest niezerowe, wobec czego czas oczekiwania jest niedeterministyczny.

Powyższa cecha układu CAN jest nieuniknioną konsekwencją przyjętej filozofii jego działania, a raczej realizacji początkowych założeń. Skoro magistralę komunikacyjną można rozbudować o dodatkowe urządzenia bez konieczności przeprogramowywania pozostałych elementów, zatem nie można wykluczyć, że w pewnej konfiguracji pojazdu pojawi się dodatkowy kontroler wysyłający dużą ilość komunikatów o niższym numerze ID, a zatem o wyższym priorytecie. Magistrala pojazdu w takiej konfiguracji opóźni obsługę komunikatów mniej pilnych w stosunku do analogicznej magistrali pozbawionej dodatkowego kontrolera. Widać z tego przykładu, że duża elastyczność nie pozostaje bez wpływu na sposób pracy magistral komunikacyjnych.

Powyższą cechą można by uznać za wadę, jeżeli wynikające z niej niedeterministyczne opóźnienie miałyby jakikolwiek wpływ na działanie systemów odpowiadających za bezpieczeństwo. Ale do takich systemów przewidziano inne typy magistral.

Podstawowymi warunkami prawidłowego funkcjonowania magistrali przy wyżej opisanym sposobie arbitrażu jest dopasowanie szybkości transmisji danych do ilości kontrolerów CAN w jednej magistrali oraz niepowtarzalność identyfikatorów rodzajów wiadomości. Arbitraż bowiem w każdym przypadku musi być jednoznaczny tak aby nie dopuścić do zablokowania magistrali dwoma różnymi komunikatami posiadającymi ten sam identyfikator.

Wysłany komunikat jest odbierany przez wszystkie kontrolery jednak tylko niektóre przekażą jego treść do mikrokontrolera aplikacyjnego (rys.1b). Stanie się to jedynie wówczas, kiedy identyfikator odebranej wiadomości znajduje się na „liście zainteresowań” odpowiedniego kontrolera CAN. W takim przypadku kontrola akceptacyjna wypada pozytywnie i wiadomość jest przekazywana dalej do mikrokontrolera aplikacyjnego.

W idealnym świecie tak zaprojektowany układ powinien pracować prawidłowo. Niestety rzeczywistość poddaje próbie nawet najlepsze pomysły, wobec czego systemy magistralowe CAN nie mogły obyć się bez mechanizmów wykrywania błędów transmisji.

Wykrywanie błędów transmisji

Pomimo wyżej opisanych cech warstw fizycznej, transportowej oraz obiektowej w protokole CAN przewidziano kilka niezależnych sposobów wykrywania błędów transmisji.

- Kontrola CRC (*Cyclic Redundancy Check* - czyli porównywanie wartości reszty z dzielenia wielomianem po stronie odbiorczej),
- Sprawdzenie zgodności formatu ramki (frame check),
- Potwierdzenie otrzymania ACK (*Acknowledge*),
- Odstępy między bitami (maks 5 długości bitów),
- Przeciwdziałanie na zwarcie (po 6ciu bitach dominujących kontrolery wykonują polecenie reset, jest to związane z ww. opisaną cechą detekcji uszkodzenia linii),
- Ograniczenie błędnej pracy przy awarii (autodetekcja niewłaściwej pracy, skutkująca wyłączeniem nadawania).

Wszystkie powyższe mechanizmy doskonale chronią magistralę przed zewnętrznymi zakłóceniami jak również przed skutkami awarii węzła sieci lub kabla. Dzięki swojej konstrukcji oraz mechanizmom zabezpieczeń magistrala CAN uchodzi za jedną z najbardziej niezawodnych magistral komunikacyjnych [7].

Cyberbezpieczeństwo magistrali CAN

Cyberbezpieczeństwo magistrali CAN stanowi wyzwanie dla współczesnych producentów pojazdów. Ze swojej natury CAN jest otwarta i elastyczna. Zatem to co stanowi zaletę z jednej strony okazuje się problemem z drugiej.

Jako że każdy komunikat nadawany przez kontroler może być odbierany przez wszystkie inne kontrolery wystarczy, że jeden z nich padnie ofiarą ataku. Dzieje się to wtedy, gdy hacker doda do magistrali pojazdu dodatkowy, fałszywy kontroler tak aby specjalnie spreparowany komunikat mógł dotrzeć wszędzie. W sieciach informatycznych, gdzie zagrożenie atakami hackerskimi nie jest niczym nowym, wypracowano już dawno zestaw zaleceń dotyczących choćby segmentacji sieci w taki sposób, aby minimalizować zasięg ewentualnych zagrożeń. W magistrali CAN pozbawionej możliwości identyfikacji nadawcy wiadomości weryfikacja autentyczności komunikatu jest po prostu niemożliwa [5][6].

Bez magistrali CAN trudno wyobrazić sobie współczesny pojazd. Jednak dla pojawiających się z biegiem czasu skrajnie różnych zastosowań konieczne okazało się opracowanie dedykowanych, innych typów magistral. Stanowią one zazwyczaj uzupełnienie, a nie alternatywę, gdyż adresują wydzielone obszary zastosowań, w których CAN okazała się albo za droga albo niedostatecznie sprawna.

4. Magistrala LIN

Celem standardu LIN (Local Interconnect Network) jest umożliwienie połączenia sieciowego prostych mikrokontrolerów o niewielkiej wydajności do sterowania układami mechatronicznymi, które nie używają bogatego zasobu komunikatów i pełnią funkcje o mniejszej wadze w systemie sterowania pojazdu. W standardzie tym ograniczono szybkości transmisji do 20 kbit/s i liczbę węzłów do 16-tu.

Magistralę LIN tworzy się przy pomocy pojedynczego przewodu, gdzie obwód zamykany jest zawsze przez masę pojazdu natomiast poziom dominujący sygnału stanowi napięcie w okolicach 0V. Poziom recesywny odpowiada stanowi logicznej jedynki i reprezentowany jest napięciem takim jak napięcie na dodatnim biegunie baterii pojazdu. Zatem logiczne zero jest po prostu zwarcie do masy pojazdu.

LIN, odmiennie niż CAN, jest oparta na architekturze Master – Slave. Oznacza to, że każdą czynność na magistrali inicjuje zawsze urządzenie pełniące funkcję Master. Komunikaty są wymieniane pomiędzy Slave i Master lub Slave i Slave, ale zawsze przy udziale i z inicjatywy urządzenia Master. W systemie tym nie ma potrzeby arbitrażu, gdyż wszystkim steruje Master i nie ma możliwości wystąpienia kolizji. Ilość urządzeń Slave w magistrali jest z góry określona i każde z nich posiada swoje niezmiennie miejsce w ramce transmisyjnej, bowiem magistrala jest w pełni synchroniczna. Za synchronizację oczywiście odpowiada Master, który na początku każdej ramki wysyła tzw. pole synchronizacyjne, czyli sekwencję naprzemiennych stanów 01010101 pozwalającym urządzeniom Slave zrównać się z podstawą czasu z sygnałem odbieranym od Mastera. Spora tolerancja odchylenia synchronizacji sprawia, że urządzenia LIN nie muszą posiadać własnych oscylatorów kwarcowych. Do zachowania odchyłki w granicach +/- 2% do końca komunikatu wystarczają proste układy RC [4].

Są jednak również podobieństwa zaczerpnięte z systemu CAN.

Otóż pomimo zasadniczych różnic w organizacji magistrali LIN podobnie jak CAN wykorzystuje adresowanie zawartością komunikatu. Wykorzystanie 6 bitów z pola nagłówka umożliwia identyfikację 64 różnych rodzajów komunikatów.

Typowym zastosowaniem LIN jest sterowanie ustawieniem foteli lub sterowane lusterek, szyb i zamków poprzez panel przycisków w drzwiach pojazdu lub też sterowanie wentylacją/klimatyzacją. W takich przypadkach urządzenie Master jest zarówno kontrolerem CAN jak i LIN, jednak urządzenia Slave są już wyłącznie kontrolowane poprzez LIN.

Zatem magistrała LIN stanowi zasadniczo kompromis, w którym obniżenie ceny rozwiązania osiągnięto kosztem jego elastyczności.

5. Magistrała FlexRay

Po przeciwnej niż LIN stronie na skali wymagań znajdują się systemy ważne dla bezpieczeństwa pojazdu w ruchu. Stanowią one osobną kategorię zwaną X-by-Wire co oddaje główny sens ich zastosowania. Umożliwiają one bowiem eliminację elementów mechanicznych w układach kierowania i hamulcowym poprzez zastosowanie aktuatorów oraz silników elektrycznych. Kierowca pojazdu wykonując ruch kierownicą w istocie dokonuje jedynie nastawienia zespołu potencjometrów, będących przetwornikami pomiarowymi służącymi zebraniu odczytów. Cała reszta to analiza oraz wydanie, wyłącznie poprzez połączenia elektryczne, rozkazu elementom wykonawczym, które wykonują odpowiedni manewr. Systemy kategorii X-by-Wire znalazły początkowo zastosowanie w lotnictwie jako Flight-by-Wire [9], później trafiły również do kolejnictwa, aby w końcu pojawić się również w samochodach. Stanowią one nieodzowny element w budowie pojazdów autonomicznych, gdzie umożliwiły pełną cyfryzację kierowania ruchem pojazdu. Cechą wspólną wszystkich systemów X-by-Wire jest nadmiarowość komunikacyjna pozwalająca na tworzenie bezpiecznych połączeń, w których eliminacja jednego sygnału na skutek zakłócenia, awarii węzła bądź połączenia nie ma wpływu na działanie całego układu.

Do głównych standardów tej kategorii należą protokoły: TTP (Time Triggered Protocol) [4] rozwijany przez konsorcjum takich firm jak Airbus, Audi, Delphi, Honeywell, PSA, Renault, TTTech oraz bardziej popularny we współczesnych pojazdach protokół FlexRay stosowany przez firmy BMW, Daimler Chrysler, General Motors, Volkswagen, Bosch i inne.

Naturalnym kontynuatorem standardu CAN jest opracowywany od 1999 roku standard FlexRay. Konstruktorzy starali się zachować w nim to co najlepsze z CAN czyli elastyczność rozbudowy systemu oraz jednocześnie wyeliminować jego podstawowe ograniczenie - brak determinizmu.

W celu pogodzenia tak odmiennych oczekiwań FlexRay wykorzystuje dwa odmienne standardy dostępu do magistrali. Dla transmisji o cechach deterministycznych oferuje dostęp do magistrali wyłącznie w funkcji czasu, natomiast dla transmisji, nazwijmy to pozostałej, czyli nie wymagającej wysokich parametrów jakościowych oferuje dostęp współdzielony dla wszystkich podłączonych do magistrali sterowników komunikacyjnych.

Zatem w celu podłączenia do wspólnych zasobów dwóch różnych metod dostępu wprowadzono cykle komunikacyjne. W każdym cyklu najpierw odbywa się statyczna część transmisji, w której dostęp poszczególnych stacji do magistrali ustalany jest na zasadzie TDMA (Time Division Multiple Access) przy czym przyporządkowanie stacji do kanałów jest stałe, zdefiniowane na etapie konfiguracji magistrali i nie podlega zmianie w całym okresie eksploatacji.

W drugiej części cyklu pozostały fragment ramki komunikacyjnej dzielony jest na tzw. mikroszczeliny, których wykorzystanie i przydział wykonywany jest dynamicznie na zasadzie rywalizacji komunikatów.

Zatem w pierwszej części cyklu obsługiwane są systemy uprzywilejowane tzn. te co do których wymagana jest wysoka niezawodność takie jak układy bezpieczeństwa czynnego (Drive/Brake-by-Wire) oraz układy bezpieczeństwa biernego. W ich działaniu nie ma miejsca na brak determinizmu zatem pracują one ściśle synchronicznie w układzie nadajnik-odbiornik. W pozostałej części cyklu trwa natomiast rywalizacja w dostępie do magistrali, gdzie komunikaty wysyłane są według kryteriów ich ważności. Dokładnie tak samo, co do zasady, jak ma to miejsce w CAN również w FlexRay o kolejności nadawania decyduje wartość binarna identyfikatora komunikatu, zatem komunikaty mniej ważne zmuszone są poczekać na swoją kolej.

Podział cyklu na część statyczną i dynamiczną odbywa się raz, w momencie konfiguracji magistrali. Dotyczy to również określeniu w części statycznej długości szczelin udostępnionych poszczególnym stacjom, gdyż w zamiarze konstruktorów są to zbyt fundamentalne zmiany, aby mogły podlegać korekcie na etapie konfiguracji wyposażenia lub tym bardziej eksploatacji pojazdu.

Nie oznacza to wcale, że FlexRay nie jest dostatecznie elastyczny. W części dynamicznej ramki, w której o dostępie do puli mikroszczelin decyduje ID komunikatu, mogą pojawiać się komunikaty właściwe dla danej wersji wyposażenia pojazdu. Jest to zaleta przeniesiona wprost z CAN będącego protoplastą FlexRay, która sprawia, że dodatkowe wyposażenie pojazdu może zostać również i tu dodane do magistrali, bez potrzeby przeprogramowywania pozostałych kontrolerów. Natomiast w odróżnieniu od CAN system FlexRay jest systemem nadmiarowym również w warstwie transportowej, a nie tylko fizycznej. Oznacza to, że magistrala pojazdu może zostać zwielokrotniona w taki sposób, aby połączenie pomiędzy istotnymi dla bezpieczeństwa elementami układu odbywało się niezależnie dwoma (lub więcej) drogami, przy użyciu niezależnego okablowania. Wówczas połączenie danych węzłów sieci nazywane jest linią, natomiast każda z dróg nazywana jest osobnym kanałem komunikacyjnym. Zastosowanie dwóch kanałów służy zwiększeniu niezawodności, lecz może również być spowodowane potrzebą dwukrotnego zwiększenia szybkości transmisji z maksymalnych 10 do 20 Mbit/s bez nadmiarowości. Połączenie węzła FlexRay z linią następuje za pomocą sterownika wyposażonego w oddzielne pary układów nadajnika/odbiornika dla każdego z kanałów. Podobnie jak w CAN wykorzystywana jest tu skręcona para przewodów miedzianych oraz w warstwie fizycznej wykorzystano transmisję różnicową napięć na obu przewodach.

Nawet nie wchodząc w szczegóły systemu FlexRay widać wyraźnie, że postawiono tu duży nacisk na bezpieczeństwo rozwiązania oraz na wyeliminowanie efektów braku determinizmu opóźnienia informacji ważnej ze względu na bezpieczeństwo ruchu pojazdu. System ten dodał brakujący element funkcjonalny w stosunku do CAN za pomocą technologii znanych z innych systemów telekomunikacyjnych pracujących synchronicznie. Natomiast kwestię zwiększenia niezawodności postanowiono rozwiązać najpewniejszą z metod, czyli nadmiarowością rozwiązania. W praktyce FlexRay okazał się być systemem dostatecznie dobrym, aby pokonać barierę wprowadzenia do powszechnego użytku pojazdów z układami X-by-Wire.

6. Podsumowanie

Systemy magistralowe w pojazdach przechodzą powolną ewolucję. Sens ich pierwotnego zastosowania dalej jest ten sam, jednak ilość oraz waga przesyłanych informacji jest nieporównywalnie większa. Do uzupełnienia całości obrazu warto wspomnieć o systemach dedykowanych specjalnym zastosowaniom takich jak MOST (Media Oriented Systems Transport) czy Bluetooth, które wprowadzić można nazwać magistralowymi oraz występują one w pojazdach jednak nie są one ważne dla ich ruchu. Pokazują natomiast złożoność potrzeb teleinformatycznych. Różnego rodzaju informacje posiadają bowiem różne wymagania względem magistrali pojazdu. Można sobie wyobrazić, że wszystkie te potrzeby mogłyby być zaspokojone odpowiednio zaprojektowaną siecią Ethernet, obsługująca różne klasy usług dla sprostania różnym wymaganiom teletransmisyjnym. Jednak koszt, złożoność technologiczna oraz problemy w diagnostyce ewentualnych niedomagań magistrali stanowiącymi przeszkodą za rozwijaniem systemów dedykowanych dla różnych, specyficznych wymagań.

W najbliższej przyszłości systemy oparte o koncepcję magistrali CAN zdają się być niezagrażone. Współczesne pojazdy łączą w sobie różne typy systemów magistralowych tworząc wspólne systemy, w których odpowiedni typ magistrali realizuje właściwe sobie zadanie. Nie należy spodziewać się w tej kwestii rozwiązań rewolucyjnych, gdyż masowość produkcji wymusza pragmatyzm postępowania konstruktorów. Nawet tak rewolucyjna zmiana jak pojazdy autonomiczne wykorzystuje istniejące układy X-by-Wire mimo wprowadzenia bardzo złożonych algorytmów decyzyjnych.

7. Literatura

- [1] www.epa.gov/clean-air-act-overview/clean-air-act-text
- [2] www.sercos.org/technology/sercos-i-and-ii
- [3] www.can-cia.org/can-knowledge/can/can-history/
- [4] Bosch R.: Sieci wymiany danych w pojazdach samochodowych. WKiŁ, Warszawa 2008
- [5] Curie R.: Hacking the CAN Bus: Basic manipulation of modern Automobile Through CAN Bus Reverse Engineering. SANS Institute, 2017
- [6] Curie R.: Developments in Car Hacking. SANS Institute, 2015
- [7] Frei M.: Samochodowe magistrale danych w praktyce warsztatowej. WKŁ, Warszawa 2016
- [8] Fryśkowski B., Grzejszczyk E.: Systemy transmisji danych. WKŁ, Warszawa 2010
- [9] Markowska K.: Rozwój infrastruktury systemu transportowego a realizacja usług transportowych, Systemy logistyczne. Teoria i praktyka, Wydanie I, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2015 r, s.157 – 170.
- [10] Golowanow Ł.: B-47 i początki fly-by-wire. www.konflikty.pl/technika-wojskowa/w-powietrzu/b-47-i-poczatki-fly-by-wire/



Mgr inż. Marcin Wawrzyński - zainteresowania naukowe obejmują zagadnienia wykorzystania danych pozyskiwanych z magistral telekomunikacyjnych pojazdów do optymalizacji procesu eksploatacji pojazdów.