

SIECI CAN

część 1

Controller Area Network (CAN) to standard przemysłowej sieci transmisyjnej, stworzonej na potrzeby przemysłu motoryzacyjnego na początku lat osiemdziesiątych przez niemiecką firmę Bosch. W roku 1993 został przyjęty za normę ISO 11898.

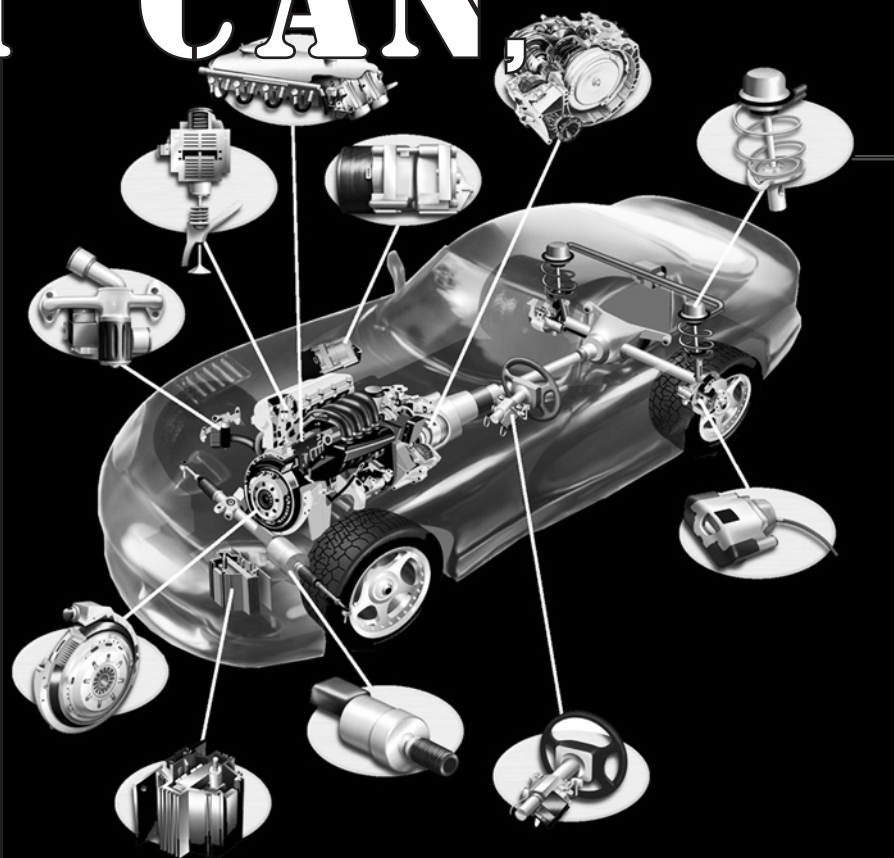
Sieci CAN są obecnie szeroko stosowane w systemach elektroniki i automatyki samochodowej oraz przemysłowej, również ze względu na rozsądny koszt ich implementacji. Można je spotkać przykładowo w:

- systemach nadzoru parametrów działania silników samochodowych stosowanych przez Mercedesa, Scanię, Iveco, BMW i wielu innych producentów;
- systemach sterowania oświetleniem zewnętrznym i wewnętrznym oraz funkcjami komfortu (klimatyzacja, sterowanie mechatroniką w siedzeniach czy oknach) w samochodach osobowych i ciężarowych;
- lotniczych i okrętowych systemach pokładowych;
- sterowaniu silnikami, pneumatyką i hydrauliką w aparaturze i maszynach przemysłowych - np. sieci SDS czy DeviceNet;
- robotyce;
- elektronice medycznej.

Najnowsza specyfikacja CAN w wersji 2.0 składa się z dwóch części - A i B. Pierwsza z nich zawiera specyfikację protokołu pokrywającego się z wersją 1.2, zaś druga opisuje unowocześnioną i przystosowaną do rosnących potrzeb wersję 2.0 w odmianach standardowej i rozszerzonej, które są aktualnie implementowane w produkowanych kontrolerach CAN. Różnice między obiema wersjami są niewielkie, a najważniejsze z nich wskazane w dalszej części tekstu.

Wprowadzenie

Standard CAN definiuje szeregowy protokół komunikacyjny, mający zastosowanie w przemysłowych systemach



rozproszonych (umożliwia również osiągnięcie założeń systemów czasu rzeczywistego), charakteryzujący się:

- wysokim bezpieczeństwem (odpornością na błędy) transmisji, dzięki rozbudowanemu systemowi wykrywania błędów i retransmisji danych;
- prędkością transmisji aż do 1 Mbps (na odległościach do kilkunastu metrów) oraz maksymalnym zasięgiem do 1 km (przy niskich prędkościach rzędu kilkudziesięciu kbps);
- architekturą multi - master (każdy z węzłów sieci ma takie same możliwości i prawa przy inicjowaniu transmisji);
- transmisją rozgłoszeniową (broadcast), gdzie informacja (ramka) jest przesyłana do wszystkich węzłów sieci, które samodzielnie (na podstawie zawartości ramki i filtrów ustawianych w kontrolerze) decydują o przetwarzaniu (bądź nie) zawartych danych - pozwala to zapewnić integralność danych w systemie rozproszonym.

Ostatnia z powyższych cech powoduje, że identyfikator wiadomości w sieci CAN nie określa adresata, lecz jej zawartość. Dodatkowo identyfikator opisuje również priorytet wiadomości

i na jego podstawie dokonywany jest arbitraż dostępu do łącza.

Wyróżnić można dwa charakterystyczne sposoby wymiany informacji między węzłami sieci:

- wysłanie danych (data frame transmission);
- żądanie wysłania danych (remote transmission request).

Wszelkie pozostałe usługi takie jak sygnalizacja błędów, retransmisja wiadomości itp. są wykonywane automatycznie przez kontrolery magistrali i nie wymagają interwencji użytkownika.

Budowa warstwowa

Specyfikacja CAN pokrywa warstwę łącza danych (drugą warstwę modeli ISO/OSI), przy czym w wersji 2.0 dzieli ją na dwie podwarstwy:

- Logical Link Control (LLC), odpowiedzialną za filtrowanie wiadomości na podstawie identyfikatorów, powiadamianie o przepełnieniach i zarządzanie odzyskiwaniem (retransmisją) wiadomości;
- Media Access Control (MAC), zajmującą się kodowaniem danych i ew. kapsułkowaniem danych, zarządzaniem dostępem do medium, wykrywaniem i sygnalizacją błędów.

Opisuje też fragment warstwy fizycznej (pierwszej w modelu OSI), definiując sposób kodowania bitu, jego uzależnienia czasowe oraz sposób synchronizacji. Sposób realizacji fizycznej może być różny w zależności od potrzeb projektanta. Niektóre z nich są zdefiniowane przez normę ISO 11898 (omówione to będzie w punkcie następnym).

Ostatnią z pokrywanych w sieciach CAN warstw modelu OSI jest warstwa aplikacji. Nie jest ona jednak definiowana przez specyfikację CAN ani przez normę ISO. Jej dobór należy wyłącznie od projektanta, co daje dużą elastyczność przy realizacji celów. Zostało zdefiniowanych dużo standardów bazujących na fundamentach CAN, z których najbardziej znane to:

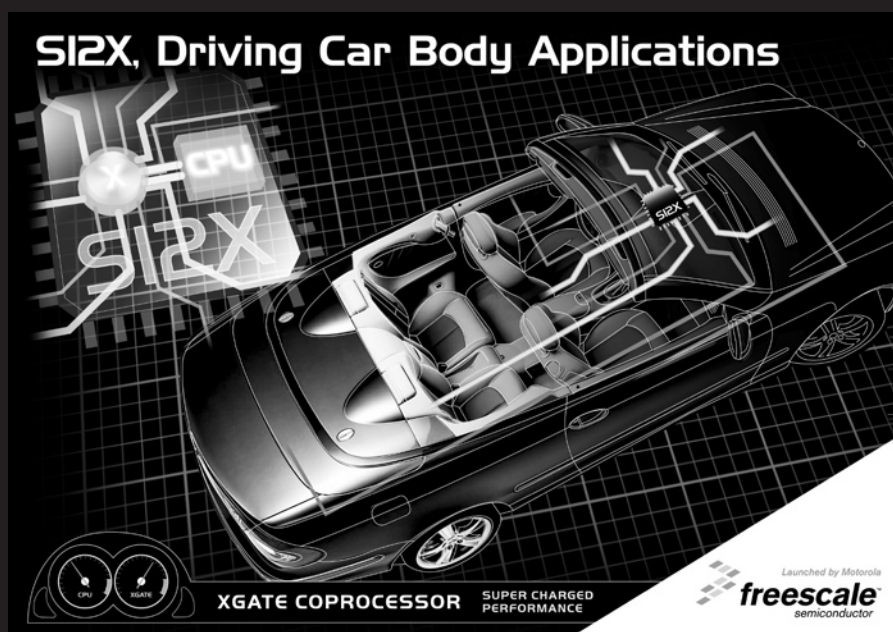
- CANopen i SAE J1939, stosowane w przemyśle samochodowym i okrętowym;
- DeviceNet oraz SDS, spotykane w automatyce.

Bardzo często stosowane są własne, często zamknięte i utajnione protokoły, czego najlepszym przykładem są protokoły sterujące modułami we współczesnych samochodach osobowych.

Warstwa fizyczna

Jak już wspomniano, sposób realizacji fizycznej transmisji nie jest opisywany przez specyfikację. Jednakże ze względu na konieczność interoperacyjności kontrolerów CAN różnych producentów stworzono kilka standardów, opisanych przez części 2 i 3 normy ISO oraz inne dokumenty. Są to:

- Najczęściej używana szybka magistrala zgodna z normą ISO 11898-2, pozwalająca uzyskać prędkość aż do 1 Mbps na odległość do 40 m (oczywiście niższe prędkości pozwalają uzyskać większe odległości, nawet do kilometra). Zbudowana jest jako dwuprzewodowa magistrala różnicowa o impedancji 120 Ω i zakresie napięć od -2 V (CAN_L) do +7 V (CAN_H). Liczba węzłów sieci ograniczona jest wyłącznie obciążeniem elektrycznym, zaś szybkość propagacji sygnału to 5 ns/m.
- Trzecia część normy (ISO 11898-3) opisuje wolniejszą (prędkość do 125 kbps) oraz ograniczoną do 32 węzłów magistralę, która charakteryzuje się wysoką odpornością na błędy, włącznie z możliwością



transmisji asymetrycznej (po jednym z przewodów, w przypadku uszkodzenia drugiego). Krótkie odległości (a więc brak problemów z odbiciami), dla których opracowany został ten standard dają możliwość stosowania magistrali otwartej, nawet w architekturze innej niż liniowa, oraz stosowania ich w urządzeniach o bardzo niskim poborze mocy.

- Norma SAE J2411 definiuje transmisję jedнопrzewodową (nawet bez ekranowania) z prędkościami 33,3 kbps lub 83,3 kbps i liczbą węzłów sieci do 32 oraz dowolną architekturą.
- Protokół *point-to-point* ISO 11992, pozwalający łączyć segmenty (np. w kolejnych przyczepach za ciągnikiem) w łańcuch (*daisy-chain*), pracuje z prędkością 125 kbps na maksymalną odległość 40 m, korzystając z nieekranowej skręconej pary przewodów jako medium.
- Spotykane są również rozwiązania sieci CAN w oparciu o media optyczne, które nie doczekały się jeszcze standardu, jednakże ze względu na coraz częstsze ich stosowanie z pewnością niedługo się to zmieni.

Budowa bitu

Standard CAN definiuje dwa rodzaje bitów: dominujący i recesywny. Ze względu na zastosowanie kodowania *Non-Return-to-Zero* (NRZ) najczęściej odpowiadają one poziomom logicznym niskiemu i wysokiemu. Nazwy „dominujący”

i „recesywny” opisują zachowanie magistrali w momencie jednoczesnej próby dostępu do medium przez dwa węzły sieci – w rywalizacji zwycięży bit dominujący, a magistrala przyjmie poziom niski (podobnie jak w „iloczynnie na drucie”). Na tym mechanizmie opiera się arbitraż (opisany w dalszej części tekstu).

Transmisja bitów w ramce CAN jest synchroniczna, przy czym synchronizacja następuje na początku ramki (bit SOF, patrz punkt dotyczący budowy ramki) oraz na każdym zboczach opadającym (tzw. resynchronizacja). Ze względu na konieczność ciągłej synchronizacji wewnątrz ramki, w trakcie transmisji może wystąpić po sobie maksymalnie 5 bitów tego samego rodzaju – w przypadku ich wystąpienia nadajnik „wstrzyknie” jeden bit komplementarny (oczywiście pomijany przy odbiorze) w celu wygenerowania zbocza synchronizującego.

Podstawową jednostką czasu w sieci CAN jest kwant (*Time Quantum*, TQ). Bit składa się z czterech nienachodzących na siebie segmentów, z których każdy trwa przez czas będący wielokrotnością kwantu TQ. Ich wzajemne zależności przedstawiono na rys. 1. Jak widać zarówno czasy trwania bitu jak i całej ramki są również wielokrotnościami czasu kwantu.

Odczyt wartości bitu w odbiorniku następuje w punkcie próbkowania (pomiędzy segmentami PHASE), zaś poszczególne segmenty spełniają następujące zadanie:

Tab. 1. Zależności czasowe między kwantem a długościami segmentów

segment	wielokrotność kwantu
SYNC_SEG	1 TQ
PROP_SEG	1...8 TQ
PHASE_SEG1	1...8 TQ
PHASE_SEG2	1...8 TQ

– W trakcie trwania segmentu synchronizacji (SYNC_SEG) może pojawić się zbocze przy przejściu z poziomu bitu poprzedniego na aktualny. Jeśli będzie to zbocze opadające, nastąpi resynchronizacja odbiorników w węzłach sieci.

– Czas segmentu propagacji (PROP_SEG) pozwala na skompensowanie opóźnień propagacji sygnału na magistrali we wszystkich węzłach. Powinien mieć długość dwukrotności czasu propagacji sygnału na magistrali i w obwodach wejściowych węzła.

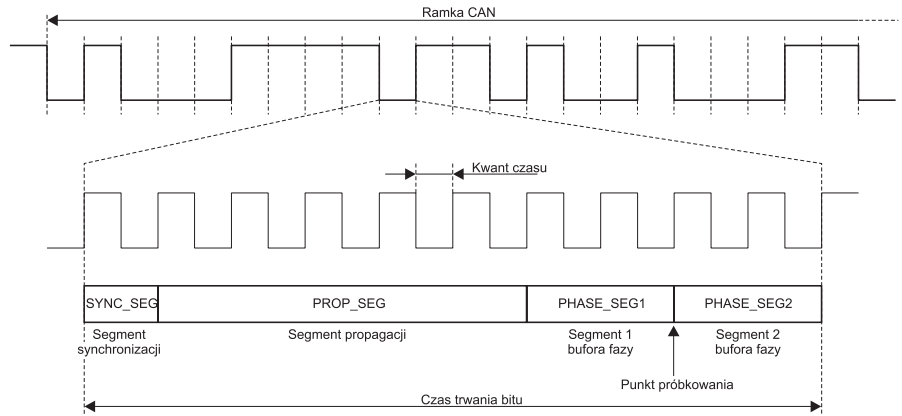
– Segmenty bufora fazy (PHASE_SEG1 oraz PHASE_SEG2) pozwalają na dostosowywanie czasu trwania bitu do przesunięć fazy zboczy resynchronizujących – mogą być skracane lub wydłużane w trakcie transmisji.

Zależności czasowe między kwantem a długościami segmentów przedstawia **tab. 1**. Czas trwania segmentu PHASE_SEG2 jest większą z dwóch wartości: długości PHASE_SEG1 i czasu potrzebnego na przetworzenie bitu pobranego w punkcie próbkowania.

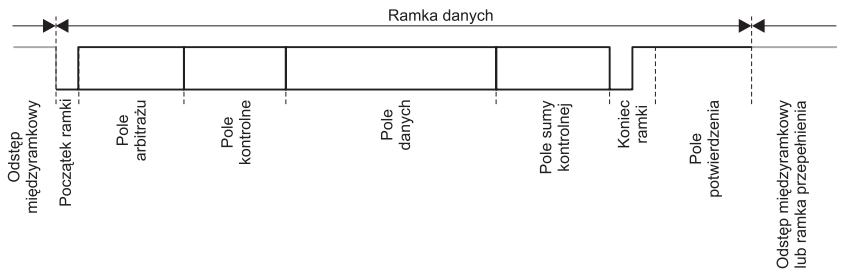
Długości poszczególnych segmentów dobierane są przez projektanta, co pozwala dopasować format nadawania do warunków fizycznych (np. większa długość magistrali oznacza dłuższy czas propagacji sygnału, co jednocześnie zmniejsza efektywną prędkość transmisji). Dodatkowo sam kontroler magistrali może, w zależności od warunków, modyfikować długości segmentów – w szczególności stosowane jest wydłużanie bądź skracanie segmentów PHASE_SEG1 i PHASE_SEG2 w celu kompensacji różnic częstotliwości oscylatorów nadajnika i odbiornika (co skutkuje problemami przy resynchronizacji).

Format ramki wiadomości

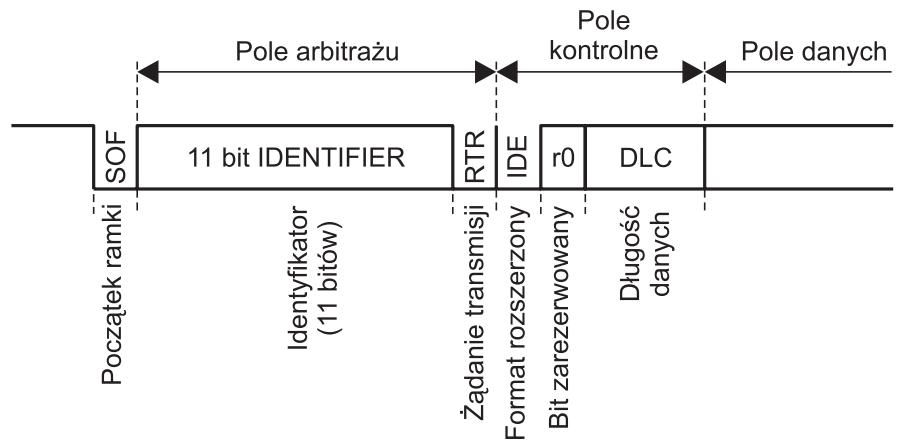
Standard CAN 2.0 opisuje dwa rodzaje ramek: standardową (podstawową) i rozszerzoną. Obie mogą współistnieć w jednej sieci, w zależności od budowy węzłów sieci. Moduły zgodne z częścią A specyfikacji lub poprzednimi jej wersjami uznają ramkę rozszerzoną za błąd, zaś niektóre zgodne z częścią B mogą je ignorować. Ogól-



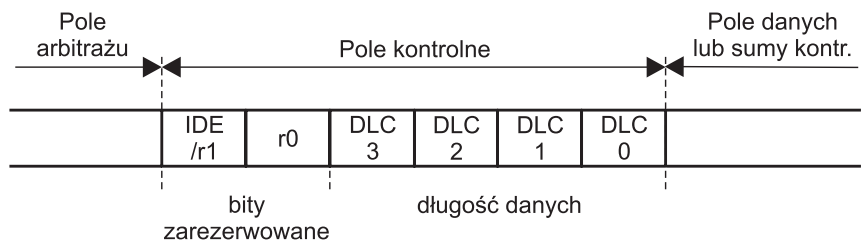
Rys. 1. Ogólny format ramki danych



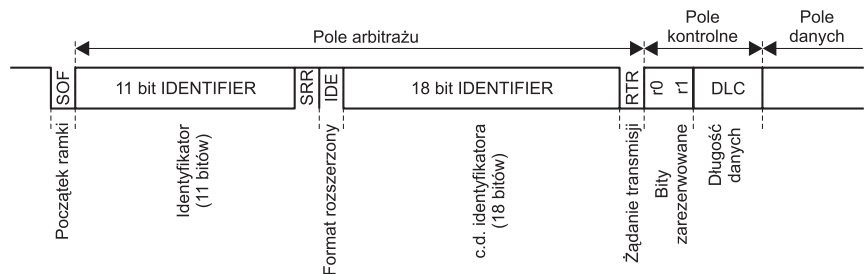
Rys. 2. Ogólny format ramki danych



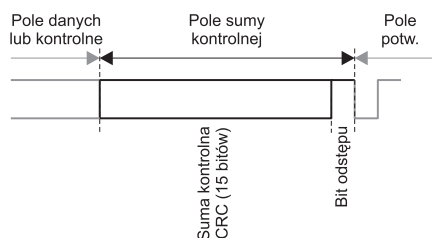
Rys. 3. Standardowy nagłówek ramki danych



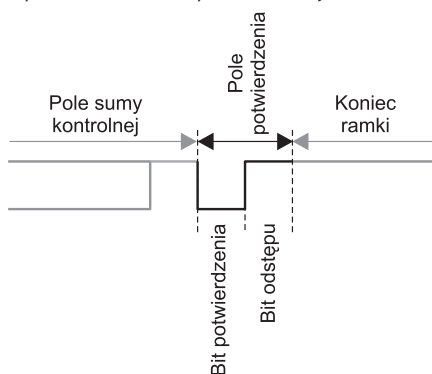
Rys. 4. Pole kontrolne



Rys. 5. Rozszerzony nagłówek ramki danych



Rys. 6. Pole sumy kontrolnej



Rys. 7. Pole potwierdzenia

na budowę ramki CAN przedstawiono na **rys. 2**. Ramka zaczyna się bitem startowym (*Start Of Frame*, SOF), po którym następuje pole arbitrażu (sposób prowadzenia arbitrażu opisany jest dalej), zawierające identyfikator wiadomości, różny w zależności od wersji ramki. Następnym elementem jest pole kontrolne, określające m.in. długość danych przekazywanych w polu danych. Integralność danych w ramce zapewnia pole sumy kontrolnej, zaś w polu potwierdzenia kontrolę nad magistralą przejmują węzły sieci odbierające wiadomość. Na zakończenie ramki wskazuje pole *End Of Frame* (EOF). Po nim następuje odstęp międzyramkowy (*Intermission Space*, IFS), mający długość min. 3 bitów. W jego trakcie jedyną aktywnością na magistrali może być wysłanie ramki przepełnienia, omówionej dalej. Po zakończeniu tego etapu magistrala jest uznawana za wolną i może być zajęta przez węzeł zainteresowany transmisją.

Nagłówek ramki standardowej

Ramka standardowa zawiera w sobie 11-bitowy identyfikator (co okazało się zbyt małą liczbą bitów w rozbudowanych systemach i doprowadziło do powstania ramki rozszerzonej), którego przynajmniej jeden z siedmiu najbardziej znaczących bitów musi być bitem dominującym. Budowa nagłówka jest przedstawiona na **rys. 3**.

W polu arbitrażu oprócz identyfikatora znajduje się bit *Remote Transmission Request* (RTR). Poziom

dominujący tego bitu oznacza zwykłą ramkę danych (*Data Frame*), zaś recesywny ramkę zdalną (*Remote Frame*). Ramka taka nie zawiera w sobie pola danych, a oznacza żądanie przesłania (zwykłą już ramką danych) informacji o identyfikatorze i długości danych zgodnych z zawartymi w żądaniu. Po pojawieniu się takiej wiadomości na magistrali, węzeł odpowiedzialny za przechowywanie żądanej informacji powinien przesłać ją najszybciej jak to jest możliwe.

Za identyfikatorem i bitem RTR znajduje się pole kontrolne (**rys. 4**), składające się z bitu określającego rodzaj ramki – dla formatu standardowego jest to bit dominujący, bit zarezerwowany oraz pole DLC określające ilość danych przesyłanych w ramce. Sposób jej przedstawiania zilustrowano w **tab. 2** (litera *d* oznacza bit dominujący, *r* – recesywny).

Nagłówek ramki rozszerzonej

Podstawową różnicą między ramką standardową, a rozszerzoną są różnice w nagłówku. Jak widać na **rys. 5**, identyfikator jest podzielony na dwie części o sumarycznej długości 29 bitów. Aby zachować zgodność z nagłówkiem standardowym pierwsza część ma długość 11 bitów, po niej następuje bit SRR, będący „wypełniaczem” miejsca po bicie RTR, który jak w poprzednim przypadku występuje po całym identyfikatorze, oraz bit IDE, który w tym przypadku ma wartość recesywną. W związku z tym, że również bit SRR jest recesywny, nie zakłócają one przebiegu arbitrażu. Drugą różnicą jest to, że pierwszy bit pola kontrolnego traci swoje znaczenie IDE i staje się bitem zarezerwowanym.

Suma kontrolna

Suma kontrolna w sieciach CAN jest obliczana ze wszystkich bitów od bitu startu (włącznie) aż do pola danych. Jest to cykliczna suma nadmiarowa (*Cyclic Redundancy Check*, CRC), obliczana za pomocą wielomianu generującego $x^{15} + x^{14} + x^{10} + x^8 + x^7 + x^4 + x^3 + 1$.

Po 16 bitach sumy występuje jeden, zawsze recesywny, bit odstępu. Budowę całego pola przedstawiono na **rys. 6**.

Potwierdzenie

Pole potwierdzenia, o długości dwóch bitów, przedstawione jest na **rys. 7**. W trakcie jego wysyłania, węzeł transmitujący ustawia na ma-

gistrali poziom recesywny i oczekuje na potwierdzenie od przynajmniej jednego z pozostałych węzłów, które odebranie bezbłędnej wiadomości powinny potwierdzić pojedynczym bitem dominującym. Jeśli taka sytuacja nie nastąpi, to wiadomość będzie retransmitowana do skutku.

Przepełnienie

W przypadku transmisji serii danych stacja odbierająca, która ma problemy z przetworzeniem danych może poprosić o opóźnienie nadania kolejnej porcji. Do tego celu służy ramka przepełnienia (*Overflow Frame*), która powinna być nadana w trakcie pierwszego bitu odstępu po ramce danych (lub żądania transmisji) – jest to jedyna dopuszczalna wówczas aktywność na magistrali.

Na ramkę przepełnienia składają się dwa pola – flaga przepełnienia, składająca się z sześciu bitów dominujących (moment ich nadania odróżnia je od opisanej dalej aktywnej flagi błędu) oraz następującego po fladze odstępu 8 bitów recesywnych.

Rozpoczęcie nadawania flagi przepełnienia zostanie wykryte przez inne węzły sieci, które odpowiedzą tym samym, co doprowadzi do superpozycji tych flag i dodatkowo wydłuży odstęp.

Arbitraż dostępu do medium

Protokół CAN opisuje sposób dostępu do medium w sposób określany jako *Carrier Sense Multiple Access with Arbitration on Message Priority*. Od typowych metod z wykrywaniem zajętości łącza różni się sposobem rozwiązywania kolizji.

Przykład takiej sytuacji jest pokazany na **rys. 8**. Węzły A i B rozpoczynają transmisję w tym samym momencie. Węzeł A chce wysłać wiadomość o identyfikatorze 0x0ef, natomiast B – 0x0ed. Bity są transmitowane począwszy od najbardziej znaczącego. Przy bicie ID1 występuje konflikt – węzeł A chce pozostawić magistralę w stanie wysokim (recesywnym), natomiast węzeł B (podobnie jak przy „iloczynnie na drucie”) ustawia ją w stanie dominującym – niskim. Ten fakt wykrywa kontroler węzła A, uznając że przegrał arbitraż i wstrzymuje transmisję swojej ramki. Z takiego mechanizmu wynika fakt, że najwyższy priorytet ma wiadomość z identyfikatorem 0x000, która powinna zawierać informacje o krytycz-

nym znaczeniu dla działania systemu rozproszonego.

Jako że, w ramach z danymi, następujący bezpośrednio po identyfikatorze bit RTR ma wartość dominującą, zaś w ramach żądaniach transmisji – recesywną, te pierwsze mają większy priorytet przy dostępie do łącza (bit RTR w oczywisty sposób również uczestniczy w arbitrażu).

Obsługa błędów

W przeciwieństwie do większości standardów, sieci CAN nie wysyłają dodatkowych informacji potwierdzających poprawne otrzymanie komunikatu (z wyjątkiem zwrotnego bitu potwierdzenia), natomiast sygnalizują wykrycie błędu. Natychmiast po zaistnieniu sytuacji awaryjnej wysyłają flagę błędu – pakiet sześciu bitów recesywnych lub dominujących, co łamie zasadę „wstrzykiwania” bitu komplementarnego po pięciu bitach jednego rodzaju.

Flaga składająca się z sześciu bitów recesywnych określana jest jako flaga pasywna – może być nadpisana przez inną stację nadającą bit dominujący. Flaga aktywna natomiast – składająca się z sześciu bitów dominujących – jest ostateczna i powoduje wstrzymanie odbioru ramki przez wszystkie węzły odbiorcze, zaś nadawca automatycznie próbuje wysłać ją ponownie.

Po fladze błędu musi nastąpić odstęp składający się z ośmiu bitów recesywnych. W tym celu każda ze stacji musi ustawić na magistrali stan recesywny i utrzymuje ten stan do momentu kiedy zrobią to wszystkie pozostałe, po czym odczekuje jeszcze przez okres siedmiu bitów.

Sprawdzanie poprawności transmisji odbywa się na poziomie ramki oraz na poziomie bitu. W pierwszym przypadku są możliwe 3 rodzaje błędów:

- błędna suma kontrolna;

- niewłaściwa (niezgodna ze standardem) struktura ramki;
- brak potwierdzenie odbioru.

Na poziomie bitów węzeł może napotkać dwie sytuacje alarmowe:

- przekłamanie bitu – węzeł nadający ramkę obserwuje jednocześnie stan magistrali, co pozwala natychmiast wykryć różnicę między bitem wysłanym a odbieranym przez inne węzły;
- „niewstrzyknięcie” bitu, opisane już wcześniej.

Stacje analizują stan sieci, poprzez prowadzenie liczników następujących po sobie błędów, osobno dla błędów wykrytych przy nadawaniu i przy odbieraniu ramek. Na podstawie tych wartości węzeł wchodzi do jednego z trzech stanów:

- stanu aktywnego (*Error Active*), w którym może wysłać aktywną flagę błędu,
- stanu pasywnego (*Error Passive*), w którym może wysłać jedynie flagę pasywną,
- stanu wyłączenia (*Bus Off*), w którym nie bierze aktywnego udziału w transmisji (nie nadaje ramek), jedynie nasłuchuje nadchodzących ramek.

Dokładny algorytm przejść między tymi stanami znajduje się w specyfikacji. W uproszczeniu polega on na zwiększaniu liczników w przypadku odnotowania błędu o wartość 1 lub 8 w zależności od jego wagi i zmniejszaniu ich o 1 po prawidłowej operacji. Progi przejść pomiędzy stanami to wartości 128 (przejście pomiędzy stanem aktywnym i pasywnym) i 256 (między pasywnym, a wyłączeniem).

Wymagania dotyczące kontrolerów

Specyfikacja definiuje również szereg wymagań, którym odpowiadać powinien kontroler magistrali CAN. Pozwala to projektantowi zrobić założenia dotyczące możliwości wszystkich węzłów sieci.

Jednym z najważniejszych zadań kontrolera jest filtrowanie wiadomości odbieranych na magistrali – przekazywanie całego ruchu do procesora węzła nie ma żadnego sensu w momencie, gdy oczekuje on

Tab. 2. Zależność pomiędzy stronami bitów DLC i długością przesyłanych danych

długość danych	DLC3	DLC2	DLC1	DLC0
0	d	d	d	d
1	d	d	d	r
2	d	d	r	d
3	d	d	r	r
4	d	r	d	d
5	d	r	d	r
6	d	r	r	d
7	d	r	r	r
8	r	d	d	d

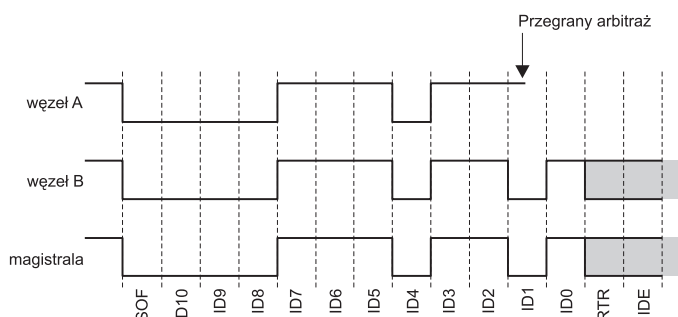
wyłącznie jednego bądź kilku rodzajów komunikatów. Kontroler musi zapewnić możliwość filtrowania ramek na podstawie identyfikatorów (aby wyłapywać jedynie komunikaty o żądanym identyfikatorze), zaś opcją jest możliwość korzystania z masek bitowych, wybierających bity które mają podlegać porównaniu (pozwala na wybór grupy komunikatów o zbliżonych identyfikatorach).

Kontroler musi pozwalać na dobranie takich długości segmentów bitu, że jego całkowity czas trwania będzie się zawierał w zakresie 8 do 25 kwantów (TQ), zaś tolerancja częstotliwości generowanej przez oscylator wynosi 1,58%. Pozwala to na zastosowanie generatorów ceramicznych w sieciach o niskiej przepływności (do 125 kbps). Możliwość ta pojawiła się dopiero w wersji 1.2 specyfikacji. W przypadku gdy w sieci znajdują się kontrolery zgodne z wcześniejszymi wersjami, bądź też w celu uzyskania większych prędkości, konieczne jest użycie generatorów z oscylatorami kwarcowymi. Istotny jest również fakt, że węzeł sieci o najwyższych wymaganiach dotyczących dokładności generatora, określa to wymaganie również dla pozostałych węzłów.

Źródła informacji

Najważniejszym materiałem źródłowym jest oczywiście norma ISO 11898, jednakże nie można pobrać jej bezpłatnie z serwisu ISO (co jest niestety typowe dla organizacji normalizacyjnych). Na szczęście faktyczny twórca standardu – firma Bosch – udostępnia specyfikację CAN 2.0 na stronie www.can.bosch.com. Dodatkowym, bardzo przydatnym i ciekawym, źródłem informacji jest również strona organizacji CAN in Automation – www.can-cia.org.

Paweł Moll



Rys. 8. Arbitraż dostępu do medium