

Jedno rešenje alata za analizu automobilske magistrala korišćenjem osciloskopa

Filip Jašić, Dejan Bokan i Zoran Marčeta

Sadržaj — Jedan od ciljeva ovog rada je da se objasni implementirano snimanje, obrada i dekodovanje signala jednog protokola koji se koristi u automobilske industriji – CAN-a, upotrebom osciloskopa. Pored pomenutog, potrebno je bilo implementirati automatizaciju upotrebe osciloskopa. Dekodovanje protokola automatskim načinom uveliko olakšava dijagnostiku automobilske mreže time što korisniku daje detaljan prikaz magistrala celokupnog sistema.

Ključne reči — automobilske magistrale, osciloskop, obrada signala, dekodovanje.

I. UVOD

Glavni pokretač razvoja mrežnih tehnologija u automobilima su bili napreci ostvareni u elektronskoj industriji. Zbog striktno kontrole štetnih gasova, morao se napraviti mehanizam za veći stepen kontrole samog automobila. Ovo se postiglo ugrađivanjem računara koji ne samo da su poboljšali upravljanje emisijom štetnih gasova, već su povećali i performanse automobila, sigurnost, komfor, ali su i doprineli smanjenju troškova proizvodnje. Tokom godina se broj elektronskih modula u automobilu povećavao.

Elektronska upravljačka jedinica (engl. *ECU*) predstavlja ugrađeni sistem koji upravlja jednim ili više elektronskih modula. U modernim vozilima može da se nađe i do 80 elektronskih upravljačkih jedinica. *ECU* dobija podatke od senzora koji se konvertuju u određenu jedinicu, gde se tako obrađeni podaci dalje šalju aktuatorima koji izvršavaju određene funkcije. Ponekad je potrebno da ovi moduli međusobno komuniciraju. Kako se vremenom povećavao broj ovih komponenti, došlo je do velike kompleksnosti u ožičavanju pojedinih modula. Štaviše, ožičavanja modula automobila su se razlikovala od modela do modela, što je dodatno povećavalo troškove proizvodnje. Odgovor automobilske industrije na prethodno opisane probleme je bio da se stvori centralna mreža u vozilu. Svaki modul, koji predstavlja čvor na automobilske mreži, kontroliše specifičnu komponentu i komunicira sa drugim modulima po potrebi korišćenjem standardnih protokola.

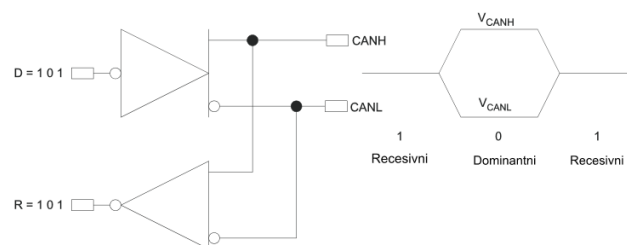
Jedan od zadataka ovog rada jeste implementacija dekodovanja signala protokola čija je upotreba česta u

automobilske industriji, čime bi se olakšala analiza celokupnog sistema. Frekventnu primenu u dijagnostici automobilske mreže ima osciloskop. Pošto svaki protokol ima svoje karakteristike koje ga razlikuju od ostalih protokola, kada se ručno radi dijagnostika osciloskopom, za svaki od protokola se osciloskop mora podesiti na odgovarajući način. Jedan od ciljeva ovog rada jeste i automatizacija podešavanja osciloskopa, a dekodovanjem signala protokola se dobija čitljiviji prikaz eventualnih grešaka ili problema na mreži, što dodatno ubrzava proces dijagnostike.

II. PROTOKOL

CAN (engl. *Controller Area Network*) [1] protokol je najzastupljeniji protokol koji se koristi u automobilske industriji. Verzija specifikacije se sastoji iz dva dela:

- A (pokriven *ISO 11519* standardom) – ovaj deo specifikacije opisuje standardni format sa 11-bitnim identifikatorom.
- B (pokriven *ISO 11898* standardom) – ovaj deo specifikacije opisuje prošireni format sa 29-bitnim identifikatorom.



Sl. 1 Razlike napona na linijama i povezanost sa reprezentacijom bita u vidu 1 ili 0.

CAN mreža poseduje mogućnost da ima više rukovodioca. Sve elektronske upravljačke jedinice se međusobno povezuju na magistralu sa dve linije (jedna se zove *CAN-H*, druga *CAN-L*). Dominantni bit predstavlja logičku nulu. Predstavljanje logičke nule kao dominantnog bita se vrši da bi elektronske upravljačke jedinice sa najnižim identifikacionim brojem imale najveći prioritet. Recesivni bit predstavlja logičku jedinicu. Logička stanja se procenjuju na osnovu razlike napona:

- Za brzu *CAN* magistralu (*ISO 11898-2*) [2]:
 - Recesivni bit predstavlja razliku od 0 V (u teoriji) između *CAN-H* i *CAN-L* linije; u praksi se ta razlika kreće od 0.5 V. Napon na *CAN-H*

Ovaj rad je delimično finansiran od strane Ministarstva za prosvetu, nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije, na projektu broj: III_044009_1.

Filip Jašić, Dejan Bokan, Zoran Marčeta, Istrazivacko-razvojni Institut RT-RK, Novi Sad, Srbija (e-mail: ime.prezime@rt-rk.com).

žici se kreće ka 5 V, dok se na CAN-L žici kreće ka 0 V.

- Dominantni bit predstavlja razliku od oko 2 V (mora bitu u rasponu između 1.5 V i 3.5 V) između CAN-H i CAN-L linije. Napon na CAN-H žici se kreće ka 5 V dok napon na CAN-L žici se kreće ka 0 V.

- Za sporu CAN magistralu (ISO 11898-3):

- Recesivni bit predstavlja razliku od bar 0.6 V između CAN-H i CAN-L linije. Napon na CAN-H žici se kreće ka 0 V, dok napon na žici CAN-L ide ka 5 V.

- Dominantni bit predstavlja razliku od bar 2.3 V između CAN-H i CAN-L linije. Napon na CAN-H žici se kreće ka 5 V, dok napon linije CAN-L ide ka 0 V.

Prenos poruka je kontrolisan sa četiri tipa okvira:

- Okvir za podatke – nosi podatke od predajnika do prijemnika. Okvir za podatke se sastoji od sedam polja (razlike između CAN 2.0 A i CAN 2.0 B su po potrebi posebno navedeni, dok se podrazumeva da ostala polja imaju istu strukturu):

- Početak okvira označava početak polja za okvir za podatke ili okvira za daljinsko upravljanje. Sastoji se od jednog dominantnog bita.

- Polje za arbitražu. Ovo polje se sastoji od identifikatora i RTR bita u slučaju CAN 2.0 A, pri čemu identifikator se sastoji od 11 bita; ovi biti se gledaju u MSB redosledu pri čemu svih 7 najznačajnijih bita (od ID-10 do ID-4) ne smeju biti recesivni. RTR bit mora da bude dominantan kada se šalje okvir za podatke, inače, kada se šalje okvir za daljinsko upravljanje ovaj je bit recesivan. U slučaju CAN 2.0 B identifikator se sastoji iz dva dela: identifikator A (11 bita) i identifikator B (18 bita). Između ova dva dela produženog identifikatora se nalazi SRR bit (1 recesivan bit) i IDE bit (1 recesivan bit).

- Kontrolno polje. Ovo polje se takođe sastoji od 6 bita, pri čemu prva 2 bita rezervisana. Nakon njih u okviru se nalaze 4 bita koji označavaju dužinu poslatih podataka.

- Polje za podatke se sastoji od 0 do 64 bita. Podaci se šalju u MSB redosledu.

- Polje za cikličnu proveru redudanse (engl. CRC field) se sastoji od 15 bita koji predstavljaju izračunatu cikličnu proveru redudanse i delimitera koji zauzima 1 bit, pri čemu je taj bit recesivan.

- Polje za potvrdu o prijemu se sastoji od ACK vremenskog intervala i ACK delimitera gde svaki od polja zauzima po 1 bit i pri čemu pošiljaoc postavlja recesivni bit u ACK vremenskom intervalu, dok primaoc poruke može da naredi slanje dominantnog bita. ACK delimeter „razdvaja“ ovo polje sa krajem okvira i ono sadrži 1 recesivan bit.

- Kraj okvira se sastoji od 7 recesivnih bita.

- Okvir za daljinsko upravljanje se šalje na magistralu kao zahtev za okvirom za podatke sa određenim identifikatorom.

- Okvir za greške se šalje od bilo kog čvora uređaja koji detektuje grešku na magistrali.

- Okvir za preklapanje se koristi da omogući kašnjenje između dva poslata okvira za podatke ili okvira za greške.

Kada god je magistrala slobodna, bilo koja elektronska upravljačka jedinica može da počne sa slanjem poruke. U slučaju da dve ili više upravljačkih jedinica počne sa slanjem poruka u isto vreme nastaje konflikt koji se rešava mehanizmom arbitraže za pojedinačne bite korišćenjem identifikatora.

Tokom arbitraže, svaki pošiljalac proverava na kom nivou se nalazi bit identifikatora koji je on poslao poredeći ga naspram nivoa bita identifikatora koji se nalazi na magistrali. Ako su ovi biti na istim nivoima jednaki, pošiljalac može da nastavi sa slanjem. Kada je recesivni bit na istom nivou poslat i dominantni bit na istom nivou se nalazi na magistrali, tada je pošiljalac „izgubio“ arbitražu i mora da se povuče, pri čemu se prekida prenos preostalih bita u okviru. Drugim rečima, pobeđuju uređaji sa najmanjim identifikatorom. Identifikator se šalje u MSB formatu, da bi se brže uočila arbitraža i da bi medijum bio efikasniji za slanje.

Ubacivanje bita se vrši na sledeći način: nakon 5 identičnih bita se ubacuje suprotan bit; ovo poboljšava usklađivanje, a dodatni biti ne menjaju podatke pošto je ubacivanje urađeno hardverski. Problem sa ubacivanjem bita je pojava takozvanih „lavinskih“ bitova (npr. 5 recesivnih bita koje prati 5 dominantnih bita) koji mogu da zbune mehanizam za prepoznavanje ubačenih bita.

Statistička učestanost grešaka CAN protokola zavisi od ukupnog broja uređaja, fizičkog ožičenja i rasporeda, kao i spoljašnjih elektromagnetnih smetnji. Tok prepoznavanja grešaka između pošiljaoca i primaoca je nezavisan od filtriranja i maskiranja na prijemu i sastoji se iz pet zasebnih mehanizama:

1. Nadgledanje pojedinačnih bita – prepoznavanje lokalnih i globalnih grešaka kod pošiljaoca; upoređuje se stanje na magistrali sa poslatim bitom; ne primenjuje se na polje za arbitražu.

2. Provera strukture – tipična polja su CRC delimiter, ACK delimiter i EOF i čine ih uvek recesivni biti.

3. Provera kodovanja (umetanje bita) – prijemnik proverava tok bita, na svakih 5 uzastopnih istovetnih bita mora da dođe ubačena promena; uključuje sve bite od SOF do kraja CRC.

4. Provera potvrde je obaveza pošiljaoca – potrebno je bar da pristigne jedna potvrda pa da pošiljalac podesi recesivni bit; takođe, potrebno je da prijem obori sa dominantnim.

5. Ciklična provera redudanse – pošiljalac proračunava pre slanja, prijemnik proverava podudaranje pri prijemu. Ciklična provera redudanse se računa na sledeći način: polinom, čiji su koeficijenti predstavljeni kombinacijom vrednosti prethodnih polja (polje za početak

okvira, polje za arbitražu, kontrolno polje, polje za podatke), pri čemu je prethodno urađeno izbacivanje ubačenih bita, a koeficijenti 15 najnižih bita čine nule. Ovaj polinom se potom deli (koeficijenti su izračunati modulom dvojke) sa generator-polinomom:

$$x^{15} + x^{14} + x^{10} + x^8 + x^7 + x^4 + x^3 + 1$$

Ostatak ovog deljenja predstavlja 15-bitnu vrednost CRC sekvence koja se šalje na magistralu kao dodatak originalne poruke. Da bi se primenila ova funkcija, 15-bitni pomerački registar se koristi.

III. IMPLEMENTACIJA

Za generisanje signala za CAN protokol korišćena je elektronska upravljačka jedinica i alat *CANoe*. *CANoe* alat je napredni alat za razvoj, testiranje i analizu kako pojedinačnih elektronskih upravljačkih jedinica, tako i kompletne mreže.

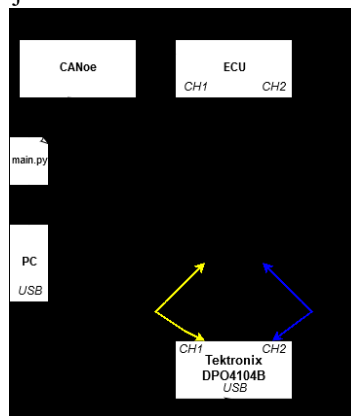
U *CANoe* je prvo kreirana odgovarajuća konfiguracija i sačuvana u konfiguracionoj datoteci sa nastavkom *.cfg*. Potom je u *CANoe Options* meniju pod *Measurement* opcijom, i u *General* prozoru *Channel Usage*, podešen odgovarajući broj CAN kanala. U *Simulation Setup* (u ovom prozoru je ukupan sistem prikazan grafički sa mrežama, uređajima, i svim mrežnim čvorovima) prozoru su potom kreirana dva ECU čvora i jedan I-Generator (koristi se za generaciju CAN signala) koji su povezani na prethodno napravljenu CAN mrežu. U meniju *Hardware* pod opcijom *Network Hardware* je nameštena odgovarajuća brzina prenosa koja mora da odgovara brzini prenosa koja se koristi za dekodovanje. Ako ovo nije pravilno podešeno, dekodovanje neće biti ispravno.

Kao deo *CANoe*, *CANdb++ Editor* predstavlja okruženje za kreiranje baze podataka (formata *.dbc*) koja opisuje celokupnu CAN mrežu. Svaka CAN mreža je definisana sa:

- Mrežom.
- Upravljačkom jedinicom.
- Promenljivama okruženja.
- Mrežnim čvorovima.
- Porukama.
- Signalima.

Potom je kreirana baza podataka za CAN mrežu u *CANoe Candb++ Editor*-u unutar koje su kreirana 2 čvora (primarni i sekundarni). Nakon toga su kreirana dva signala, pri čemu je jedan rezervisan za slanje podataka od primarnog čvora do sekundarnog, a drugi za slanje obrnutim smerom. Zatim su ovi signali mapirani za odgovarajuću poruku koja je prethodno kreirana. Na kraju su ove poruke mapirane na svaki od odgovarajućih čvorova, čime se završava kreiranje baze podataka. Unutar *I-Generator*-a su kreirani signali koji će se slati od primarnog do sekundarnog čvora. Za pravljenje signala mora se odabrati kanal, identifikator, tip signala (da li je sa standardnim identifikatorom ili produženim), dužina podataka, a unutar *Raw Data* prozora se konfiguriše svaki od okteta za slanje.

Nakon podešavanja konfiguracije u *CANoe*-u i uključivanja napravljene baze podataka, urađeno je povezivanje elektronske upravljačke jedinice i računara USB kablom, a zatim je pokrenuta simulacija dok su sa druge strane povezane dve probe osciloskopa na *CAN-H* i *CAN-L* kanal čije su linije izvedene i priključene na prototipsku ploču (Sl. 2). Pre samog pokretanja konfiguracije, mora se potvrditi da unutar *Home* prozora da je konfiguracija podešena u *Online Mode* (kada se podaci sa trenutnog merenja koriste – hardverski ili simulacijom, za razliku kada se koriste podaci iz jednog od fajlova za evidentiranje) i da se koristi *Real Bus* (za razliku od simulirane magistrale), pošto će se signal generisati upotrebom elektronske upravljačke jedinice. Praćenje signala u vremenu se vrši unutar *Data* prozora iz *Analysis* menija.



Sl. 2 Dijagram povezivanja CAN-a.

Nakon što su prikupljeni podaci, uzorkuju se na vrednosti prethodno podešene horizontalne skale. Vrednosti koje imaju napon veći od postavljenog okidača se postavljaju na 1, u suprotnom se postavljaju na 0. Izmereni signal se može predstaviti kao niz jedinica i nula. Da bi se našao smisao niza jedinica i nula korišćen je *Knuth-Morris-Pratt* [4] algoritam za pretragu nizova koji traži pojavu obrasca unutar niza, ali kada dođe do neslaganja, obrazac se pomera za neki optimalan broj karaktera, tako zaobilazeći preispitivanje ranije usklađenih karaktera, sto ubrzava pretragu. Potom se izdvajaju svi relevantni okviri, vrši se konverzija dobijenih binarnih brojeva u heksadecimalnu vrednost i izračunava se ciklična provera redudanse. Ako se ova izračunata provera poklapa sa cikličnom proverom redudanse izdvojenom iz signala, glavnom programu se prosleđuje dekodovan CAN signal sa naznakom da je provera tačna, u suprotnom, prosleđuje se dekodovan CAN signal sa naznakom da provera nije tačna. Upotrebom *Knuth-Morris-Pratt* algoritma se prepoznaju lavinski biti i 5 istih dominantnih ili recesivnih bita. Tek nakon ovoga se moglo nastaviti sa dekodovanjem pri čemu se gleda 13. bit signala koji ukazuje na to da li je korišćen *CAN 2.0 A* ili *CAN 2.0 B*, što je važno odrediti da bi signal bio pravilno dekodovan.

Prilikom izrade ovog rada, za merenje napona signala korišćen je *Tektronix DPO 4104B* osciloskop. Ovaj osciloskop ima četiri nezavisna kanala.

Sl. 3 prikazuje generisani *CAN* signal snimljen na osciloskopu. U ovom radu je korišćen jedan ili dva kanala osciloskopa u zavisnosti od protokola koji se koristi. Okidači su potom podešeni za nivoe izmerenog napona, horizontalnu i vertikalnu skalu. Na samom početku ovo podešavanje je bilo ručno, praćenjem uputstva za upotrebu ovog osciloskopa [3], potom automatski – komunikacijom preko *USB*-a upotrebom *API*-ja.



Sl. 3 Prikaz ekrana osciloskopa snimanja *CAN* signala.

Komunikacija sa osciloskopom je urađena upotrebom *PyVisa* Pajton modula. Kod je pisan praćenjem *PEP8* [5] konvencije. *PyVisa* omogućava inicijalizaciju osciloskopa kao objekata klase. Razmenjivanje podataka sa osciloskopom se svodi na dve metode klase. Praćenjem priručnika za programere od *Tektronix*-a [6] za ovaj model osciloskopa poslate su komande kao parametar jednoj od dve prethodno opisane metode, u zavisnosti od namene (da li se želi podešavanje osciloskopa ili prikupljanje podataka). Poslate su komande za odabir kanala, postavljanje horizontalne i vertikalne skale, a potom za prikupljanje podataka nakon svake detekcije okidača.

IV. REZULTATI

Uporednom metodologijom (poređenjem izlaza programskog rešenja i generisanog signala) se utvrdila ispravnost implementiranog dekodera. U slučaju *CAN* protokola, poređenjem dekodovane kontrolne sume snimljene sa osciloskopa i izračunate kontrolne sume se dodatno garantuje ispravnost implementiranog programskog rešenja. Sl. 4 predstavlja primer uspešnog izlaza dekodovanog signala na komandnoj liniji.

```
C:\Users\jasic\Desktop\diplomski git\oscilloscope-bachelor\project\main.py CAN
press Ctrl+C to stop measurement
if red color shows up, data is not correct
else green it's all good!
...
CAN - CSV output done
id(standard): 01 | length: 4 | data: ['11', '12', '13', '14'] | crc: [1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0]
id(standard): 01 | length: 4 | data: ['11', '12', '13', '14'] | crc: [1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0]
id(standard): 01 | length: 4 | data: ['11', '12', '13', '14'] | crc: [1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0]
id(standard): 01 | length: 4 | data: ['11', '12', '13', '14'] | crc: [1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0]
id(standard): 01 | length: 4 | data: ['11', '12', '13', '14'] | crc: [1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0]
id(standard): 01 | length: 4 | data: ['11', '12', '13', '14'] | crc: [1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0]
id(standard): 01 | length: 4 | data: ['11', '12', '13', '14'] | crc: [1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0]
id(standard): 01 | length: 4 | data: ['11', '12', '13', '14'] | crc: [1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0]
id(standard): 01 | length: 4 | data: ['11', '12', '13', '14'] | crc: [1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0]
id(standard): 01 | length: 4 | data: ['11', '12', '13', '14'] | crc: [1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0]
```

Sl. 4 Primer izlaza uspešnog dekodovanja *CAN*-a.

Testiranje je obavljeno sa velikom količinom različitih signala (različiti okviri kako u varijaciji sadržaja okvira identifikatora i okvira podataka tako i u veličini okvira podataka) upotrebom elektronske upravljačke jedinice, pri čemu se posebno povelu računa da se šalju okviri za testiranje mehanizma za detekciju „lavinskih“ bitova u slučaju dekodovanja *CAN* signala. I u ovom slučaju je testiranje uspešno izvršeno.

V. ZAKLJUČAK

Funkcionalnost implementiranog dekodera olakšava analiziranje signala koji se često koriste u automobilske industriji, time što korisnik ovog programa ne mora da konstantno vodi računa o podešavanju samog osciloskopa, već je podešavanje i analiza signala automatski urađeno. Dalji razvoj će se fokusirati na realizaciju automatske detekcije korišćenog protokola.

LITERATURA

- [1] *CAN Specification Version 2.0*, Robert Bosch GmbH, 1991, <http://esd.cs.ucr.edu/webres/can20.pdf>
- [2] *ISO 11898-1, "Road vehicles — Controller area network (CAN) — Part 1: Data link layer and physical signaling*, ISO, First edition, Geneva, Switzerland, 2003.
- [3] *MSO4000B and DPO4000B Series Digital Phosphor Oscilloscopes User Manual*, Tektronix, <https://download.tek.com/manual/071281002web.pdf>
- [4] Thomas H. Cormen, Charles E. Leiserson, Ronald L. Rivest, Clifford Stein, "Introduction to Algorithms", Third Edition, The MIT Press, London, England, 2010.
- [5] Guido van Rossum, Barry Warsaw, Nick Coghlan (2001, Jul), *PEP 8 -- Style Guide for Python Code*, <https://www.python.org/dev/peps/pep-0008>
- [6] *MSO4000 and DPO4000 Series Digital Phosphor Oscilloscopes Programmer Manual*, Tektronix, <https://download.tek.com/manual/077024801web.pdf>

ABSTRACT

One of the tasks of this paper is to explain implementation of recording, processing and decoding signals one of the protocols used in the automotive industry – CAN, using an oscilloscope. In addition to this, it was necessary to automate the use of oscilloscope. The decoding of the protocols automatically makes it easier to diagnose car networks by giving the user a detailed view of the system bus.

**One solution for the automotive bus analysis tool
using oscilloscope**
Filip Jašić