



**Tomasz
Mikos**

Wykorzystanie danych zarejestrowanych w sterowniku poduszek gazowych w rekonstrukcji wypadku drogowego

Streszczenie

Współczesne samochody coraz powszechniej wyposażane są w rejestratory danych wypadkowych. Ich odczyt stanowi bardzo cenne źródło informacji, ponieważ wspomaga proces rekonstrukcyjny prowadzony na podstawie tradycyjnych metod analitycznych. Dzięki takim urządzeniom jak CDR Bosch czy ADW Axes jest to proste i szybkie, ponieważ komunikacja pomiędzy urządzeniem odczytującym a sterownikiem (poduszek gazowych) odbywa się automatycznie przez standardowe złącze diagnostyczne lub – jeżeli zajdzie konieczność demontażu sterownika z pojazdu – przez dodatkowy przewód komunikacyjny. Tak prowadzone badania nie wymagają żadnych skomplikowanych przygotowań. W ruchu drogowym uczestniczy jednak pokaźna grupa starszych pojazdów, w których pomimo zapisywania informacji na temat opóźnień w czasie zderzenia, producenci nie przewidzieli możliwości ich odczytu. W artykule zaproponowano sposób podejścia do pozyskania tego typu danych, ich interpretacji oraz wykorzystania w rekonstrukcji przebiegu zdarzenia.

Słowa kluczowe

Opóźnienie, Δv , EES, sterownik poduszek gazowych, mikrokontroler, EEPROM, akcelerometr, programator, dane cyfrowe.

Otrzymano 17 czerwca 2024 r., zatwierdzono do druku 28 sierpnia 2024 r.

DOI 10.4467/15053520PnD.24.008.20264

1. Wstęp

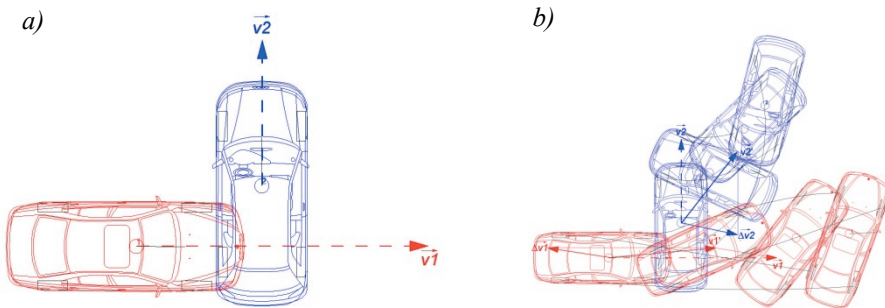
Systemy bezpieczeństwa biernego są stosowane w pojazdach samochodowych od kilkudziesięciu lat i znacząco przyczyniają się do ochrony osób jadących przed doznaniem obrażeń w następstwie zdarzeń drogowych. Zasada działania tych systemów jest powszechnie znana, jednakże nawet w literaturze specjalistycznej informacje dotyczące ich funkcjonowania są przedstawiane w sposób zbyt ogólny, niepozwalający na pozyskanie informacji na temat zmian w dynamice pojazdów,

Mgr inż. Tomasz Mikos, Biuro Inżynierskie www.tomaszmikos.pl.

do jakich dochodzi w następstwie zderzeń. Z tego powodu nie znajdują one praktycznego zastosowania w pracy biegłych i rzeczoznawców zajmujących się rekonstrukcją wypadków drogowych. Nie ulega wątpliwości, że aktywacja takich systemów wymaga osiągnięcia ściśle określonych progowych wartości parametrów zderzeniowych. Wartości te wynikają z kryteriów opracowanych przez producentów pojazdu i gdyby udało się je w jakiś sposób zidentyfikować, a następnie odczytać i zinterpretować, to droga do ich wykorzystania w procesie rekonstrukcyjnym stałaby się otwarta. Pozyskane dane mogłyby stanowić dodatkowe źródło informacji pozwalające zweryfikować prawidłowość tradycyjnego procesu obliczeniowego.

2. Zarys problemu

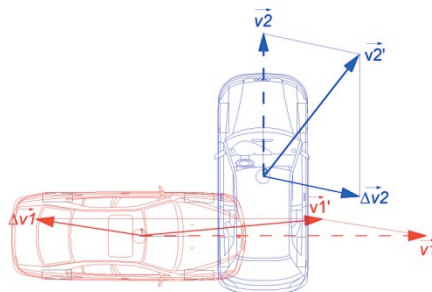
Rozważmy hipotetyczne zderzenie dwóch pojazdów, tak jak przedstawiono to na rycinie 1.



Ryc. 1. Przykładowe zderzenie dwóch pojazdów: a) konfiguracja kolizyjna, b) ruch po zderzeniu.

Jednym z zasadniczych celów działań rekonstrukcyjnych jest ustalenie wartości prędkości kolizyjnej każdego z pojazdów v_1 i v_2 . W ujęciu wektorowym związek pomiędzy tymi prędkościami, a prędkościami tuż po zderzeniu \vec{v}'_1 i \vec{v}'_2 przedstawiono na ryc. 2.

$$\vec{v}_1 = \vec{v}'_1 - \Delta\vec{v}_1, \quad \vec{v}_2 = \vec{v}'_2 - \Delta\vec{v}_2$$



Ryc. 2. Równania wektorowe i geometryczny rozkład prędkości w trakcie zderzenia.

Wielkością łączącą prędkość kolizyjną z prędkością pozderzeniową jest parametr Δv (Δv_1 i Δv_2), który stanowi prędkościowy odpowiednik zmian dynamiki pojazdów na skutek zderzenia. Ustalenie prędkości pokolizyjnych \vec{v}_1 i \vec{v}_2 nie nastrocza na ogół większych problemów. Wykorzystujemy tutaj klasyczne hipotezy dotyczące ruchu pozderzeniowego sformułowane przez Marquardta, Burga czy McHenry’ego. Są one szczegółowo omówione w literaturze [16] i dobrze znane, dlatego przedstawianie ich w tym artykule nie jest konieczne. Zupełnie inaczej wygląda to jednak w przypadku drugiego ze składników występujących po prawej stronie równań, czyli wspomnianej zmiany prędkości, której nie da się ustalić w oparciu o ślady kryminalistyczne¹, jakie można ujawnić na miejscu wypadku. Potrzebne jest tutaj całkowicie inne podejście.

3. Sterownik poduszek gazowych jako źródło informacji

Jeżeli dynamika zderzenia jest odpowiednio duża, to w pojeździe dochodzi do wyzwolenia pirotechnicznych elementów układu bezpieczeństwa biernego, takich jak napinacze pasów i poduszki gazowe. Zadziałanie systemu opiera się na kryteriach bazujących na progowych wartościach takich wielkości kinematycznych jak: przemieszczenie, prędkość, przyspieszenie czy zryw², jak również dynamicznych: energia i moc oraz ich pochodne. Kryteria te są nieodłączną częścią każdego systemu bezpieczeństwa biernego i producenci poddają je ochronie patentowej. To sprawia, że informacje na ich temat są ogólnie dostępne. Na rycinie 3 zestawiono przykładowe kryteria bazujące na wspomnianych wielkościach fizycznych oraz odpowiadające im rozwiązania patentowe.

Samochodowy system bezpieczeństwa biernego, jak każdy system sterowania, składa się z trzech zasadniczych części: zespołu czujników (sensorów), komponentów wykonawczych (aktuatorów) oraz modułu sterującego. Czujniki mierzą parametry ruchu pojazdu. Elementami wykonawczymi są napinacze pasów bezpieczeństwa oraz poduszki gazowe. Moduł sterujący znajduje się pomiędzy obydwoma wspomnianymi grupami i w systemach SRS jego rolę pełni sterownik poduszek gazowych (ACM³). Przykład takiego sterownika pokazano na rycinie 4.

To w nim gromadzone są dane, które porównywane są z wartościami progowymi wynikającymi z kryteriów i właśnie tu należy poszukiwać informacji przydatnych w rekonstrukcji wypadku drogowego.

¹ Ślady kryminalistyczne – w zdarzeniach drogowych są to wszelkie zmiany powstałe w obiektywnej rzeczywistości w następstwie zdarzenia, mogące stanowić podstawę ustalenia jego przebiegu.

² Inaczej „szarpnięcie” (ang. *jerk*) – rozumiane jako trzecia pochodna przemieszczenia po czasie $\frac{d^3s}{dt^3}$.

³ ACM – ang. *Airbag Control Module*, sterownik poduszek gazowych.

US Patent No.	Year	Inventor	Assignee	Title	Description
5394326	1995	Liu	Delco Electronic Corporation	Air bag deployment control system and method	ΔV + acceleration
5430649	1995	Cashler	Delco Electronic Corporation	SIR deployment method based on occupant displacement and crash severity	ΔV + jerk + displacement + acceleration
5587906	1996	McIver	TRW Inc.	Method and apparatus for sensing a vehicle crash condition using velocity enhanced acceleration crash metrics	ΔV + acceleration
5668720	1997	Takahashi	Toyoda Gosei Co., Ltd.	Air bag controlling apparatus	ΔV + jerk + acceleration
5777225	1998	Sada	Sensor Technology Co.	Crash sensor	ΔV + jerk + displacement + acceleration
5835007	1998	Kosiak	Delco Electronic Corporation	Method and apparatus for crash sensing using anticipatory sensor inputs	ΔV + acceleration
5948032	1999	Huang	Ford Global Technologies	Polynomial windowing algorithm for impact responsive activation	ΔV + jerk + displacement + energy
5999871	1999	Liu	Delphi Technologies	Control method for variable level airbag inflation	ΔV + jerk
6236921	2001	McConnell	Visteon Global Technologies	Three Speed Algorithm for Airbag Sensor Activation	ΔV + jerk + displacement
7424354	2008	Shen	Delphi Technologies	Supplemental restraint deployment method using dynamic crash classification	ΔV + jerk + displacement

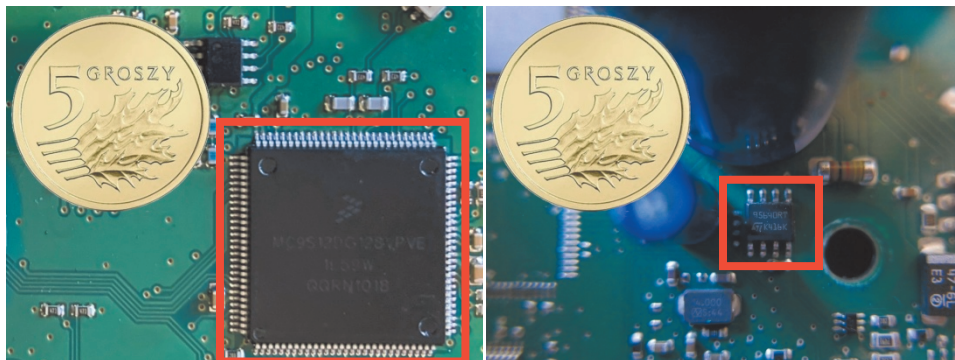
Ryc. 3. Przykłady kryteriów zadziałania systemów SRS⁴ i rozwiązania patentowe [15].



Ryc. 4. Przykład sterownika poduszek gazowych.

⁴ SRS – ang. *Supplementary Restraint System*, bierny system bezpieczeństwa, którego zadaniem jest ochrona kierowców i pasażerów, a podstawowymi elementami są poduszki gazowe i napinacze pasów bezpieczeństwa.

Współczesne sterowniki wykonywane są w technologii SMD⁵ i mogą mieć różne rozwiązania. Występują one zasadniczo w dwóch wariantach. W pierwszym pamięć danych EEPROM⁶ znajduje się w mikrokontrolerze, w którym także umieszczono pamięć rozkazów wraz z programem wykonawczym, natomiast w drugim jest to osobny element w postaci małego układu, mającego najczęściej 8 wyprowadzeń (pinów). Obydwa rozwiązania pokazano na rycinie 5.

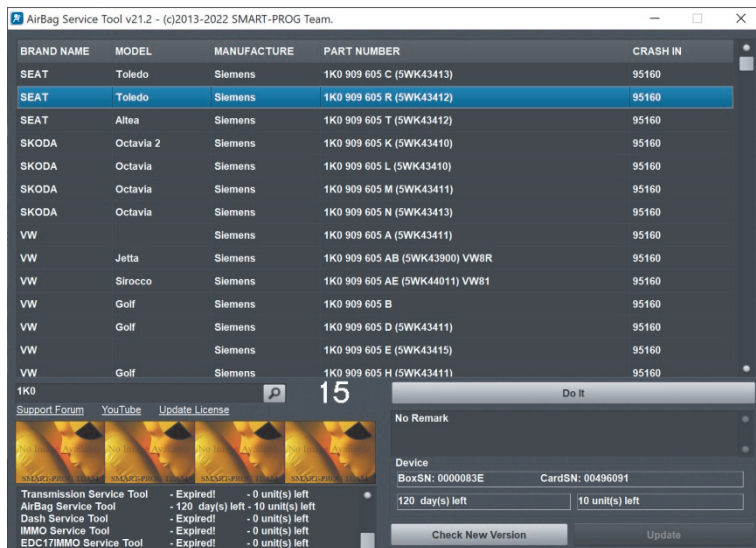


Ryc. 5. Przykłady pamięci EEPROM: zintegrowanej z mikrokontrolerem (po lewej) oraz w postaci osobnego układu elektronicznego (po prawej).

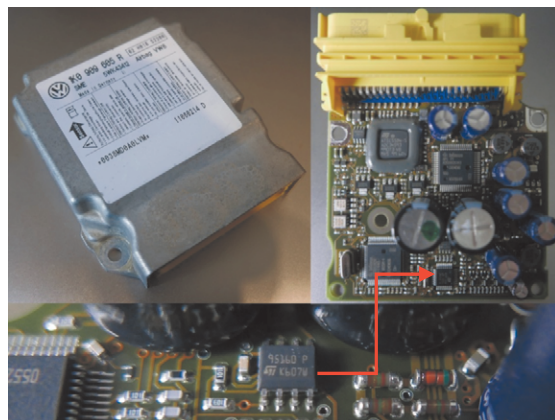
Informacji o tym, jakie konkretnie rozwiązanie znalazło zastosowanie w danym sterowniku, należy poszukiwać w dokumentacji technicznej, która na ogół jest dostarczana wraz z urządzeniem dedykowanym do konkretnego typu układów elektronicznych. Dla układów poduszek gazowych w dokumentacji zawsze będą podane informacje dotyczące marki i modelu pojazdu, numeru katalogowego sterownika oraz typu mikrokontrolera lub układu pamięci, w których gromadzone są dane wypadkowe. Na rycinie 6 pokazany jest wyciąg z dokumentacji jednego z programatorów na podstawie którego ustalono miejsce zapisu danych w sterowniku poduszek gazowych Seata Toledo o numerze katalogowym producenta 1K0 909 605 R. Ostatnia kolumna tabeli dostarcza informacji, że w tym sterowniku dane zostały zapisane w układzie EEPROM o numerze 95160. Demontaż sterownika potwierdził obecność takiego właśnie nośnika danych (ryc. 7). W przypadku ustalenia miejsca zapisu danych wypadkowych w innych sterownikach postępuje się w analogiczny sposób.

⁵ SMD – ang. *Surface Mount Device*, urządzenie do montażu powierzchniowego.

⁶ EEPROM – ang. *Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory*, kasowalna i programowalna elektrycznie pamięć tylko do odczytu.



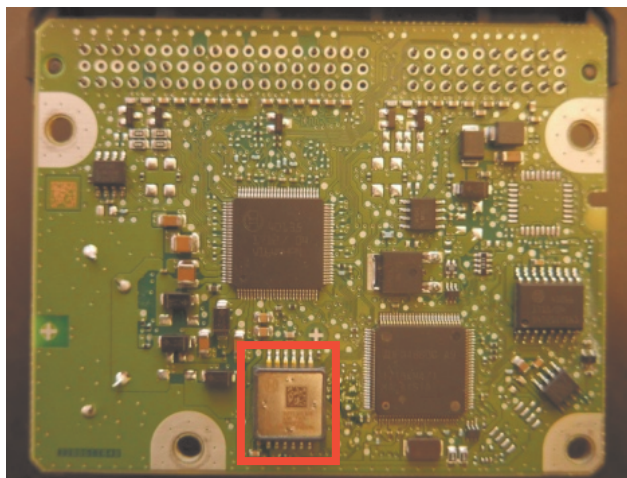
Ryc. 6. Miejsce zapisu danych w sterowniku poduszek gazowych Seata Toledo o numerze katalogowym 1K0 909 605 R.



Ryc. 7. Usytuowanie pamięci EEPROM 95160 w sterowniku poduszek gazowych Seata Toledo.

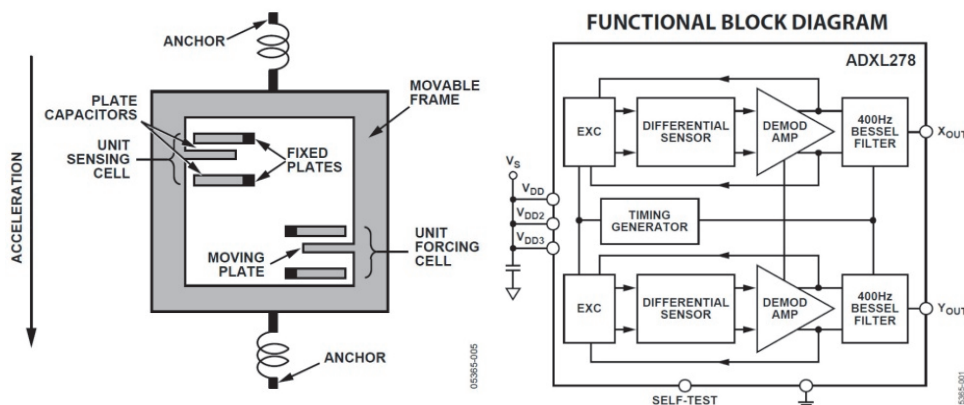
4. Wartości mierzone

Na początku artykułu wskazano, że w sterowniku poszukujemy informacji na temat zmiany prędkości pojazdu w trakcie zderzenia, natomiast w rzeczywistości tego typu dane są już wynikiem obliczeń. Wielkościami rejestrowanymi przez sterownik są opóźnienia i przyspieszenia. Współcześnie produkowane akcelerometry, podobnie jak mikroprocesory i pamięci, są wykonane w technologii SMD i razem z nimi znajdują się na płycie sterownika. Przykład takiego akcelerometru pokazuje rycina 8.



Ryc. 8. Płyta sterownika poduszek gazowych ze wskazaniem akcelerometru.

Idea pomiaru opiera się na zmianie pojemności elektrycznej mikrocondensatorów różnicowych wchodzących w skład czujnika. W każdym z nich występują stałe i ruchome płytki, pomiędzy którymi zmienia się odległość na skutek wstrząsu wywołanego zderzeniem, co pociąga za sobą zmianę pojemności elektrycznej. Ta zmiana wpływa z kolei na napięciowy sygnał wyjściowy, który jest wprost proporcjonalny do działającego przeciążenia. Ogólna zasada działania akcelerometrów SMD pokazana jest na rycinie 9.



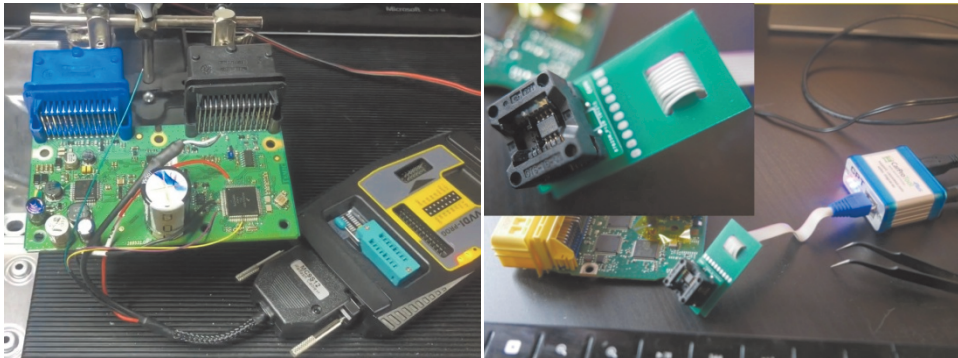
Ryc. 9. Ogólna zasada działania akcelerometrów SMD [1].

Sygnał z akcelerometru jest wzmacniany i filtrowany, a następnie, po spełnieniu warunków zdefiniowanych w algorytmie sterującym pracą układu poduszek gazowych, zapisywany w pamięci EEPROM.

5. Odczyt danych

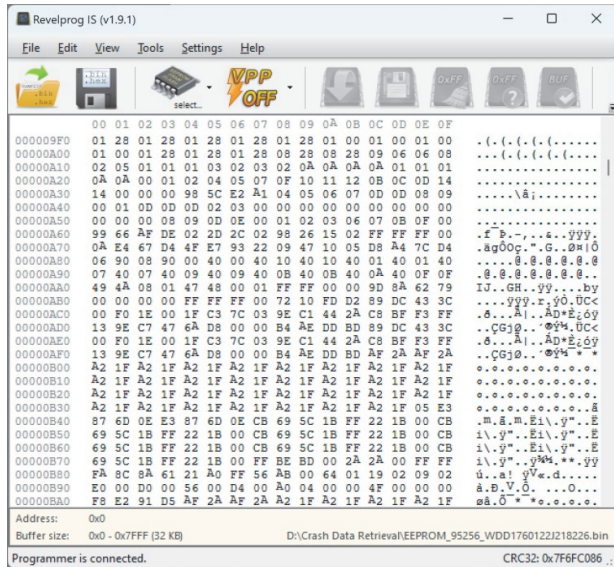
Do odczytu danych zapisanych w sterowniku służą programatory. Ich wybór jest bardzo duży i można korzystać zarówno z urządzeń dedykowanych dla branży motoryzacyjnej jak i z urządzeń uniwersalnych. Wadą tych pierwszych jest znaczny koszt, który dotyczy nie tylko zakupu, ale także opłacania okresowego abonamentu. Tej niedogodności nie ma w przypadku programatorów uniwersalnych, jednakże w tym przypadku trzeba liczyć się z tym, że dany programator obsłuży jedynie wąską grupę sterowników i czasem może zająć konieczność zakupu kolejnego urządzenia. Opcją może być także samodzielne zaprojektowanie i wykonanie programatora, ale wówczas niezbędna jest bardziej zaawansowana znajomość elektroniki oraz wiedza z zakresu architektury mikrokontrolerów i ich programowania.

Sposób podłączenia programatora do źródła danych jest zawsze podany w dokumentacji technicznej danego urządzenia. W przypadku pamięci EEPROM zintegrowanych z mikrokontrolerem należy najczęściej połączyć przewody programatora z określonymi nóżkami (pinami) procesora odpowiedzialnymi za zasilanie i transmisję danych. W przypadku osobnych pamięci EEPROM dobre rezultaty daje wylutowanie elementu z układu, na przykład przy pomocy nadmuchu gorącego powietrza *hot-air* i umieszczenie jej w adapterze SOIC-8, który połączony jest z programatorem. Przykłady rozwiązań pokazane są na rycinie 10.



Ryc. 10. Sposoby podłączenia programatora do pamięci EEPROM.

Jeżeli połączenie pomiędzy pamięcią a programatorem zostanie skonfigurowane prawidłowo, to możliwe jest jej odczytanie za pomocą oprogramowania dostarczanego wraz z urządzeniem. Efektem tych czynności jest plik binarny, który może zostać zapisany w jednym z kilku typowych formatów, na przykład takich jak BIN czy HEX. Zawartość pamięci zostanie także wyświetlona w postaci heksadecymalnej (szesnastkowej) oraz ASCII (znakowej) na ekranie (ryc. 11).



Ryc. 11. Zawartość pamięci EEPROM odczytanej ze sterownika poduszek gazowych.

6. Interpretacja zapisu

Kolejnym krokiem po odczytaniu zawartości pamięci jest interpretacja otrzymanych danych. Każde dwa znaki zapisu szesnastkowego odpowiadają jednemu bajtowi danych. Bajt ten może przybierać wartość od 00 do FF, co w systemie dziesiętnym (decymalnym) odpowiada przedziałowi $(0-255)_{dec}$ ⁷. Sposób przeliczania wartości z jednego systemu na drugi pokazano na rycinie 12.

Jeżeli spojrzeć na przedział $(0-255)_{dec}$ przez pryzmat faktu, że akcelerometry wykorzystywane w branży *automotive* mierzą podczas zderzenia przyspieszenia i opóźnienia wyrażone jako wielokrotność przyspieszenia ziemskiego g, to da się zauważyć bliskość rzędów wielkości. Jest oczywiście prawdą, że podczas wypadków drogowych przeciążenia zbliżone do poziomu 255g praktycznie nie występują, niemniej jednak kilka okoliczności powoduje, że większość zakresu pamięci i tak jest z powodzeniem wykorzystana.

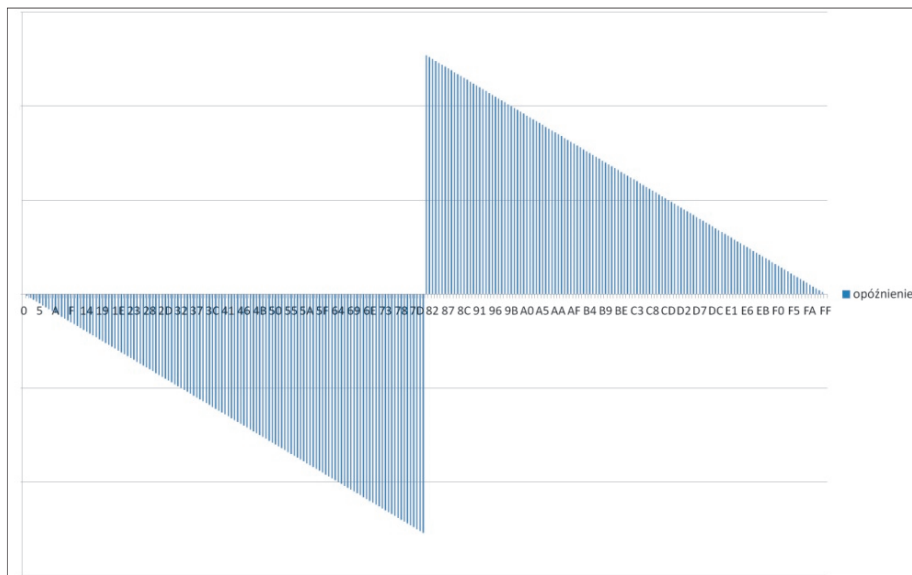
Przed wszystkim w zależności od charakteru zderzenia pojazd może uzyskać nie tylko znaczną chwilową zmianę opóźnienia, ale również przyspieszenia (np. przy uderzeniu od tyłu). Zapis pojedynczego bajtu pamięci składa się wyłącznie z dwóch cyfr heksadecymalnych i nie ma tu miejsca na wprowadzenie notacji znaków „±”. W związku z powyższym we wspomnianym przedziale należy wyróżnić dwa podprzedziały, z których jeden odpowiada za wartości ujemne np. $(0-128)_{dec}$,

⁷ Konwersja tego zapisu na system binarny (dwójkowy) odpowiada zakresowi (00000000–11111111), co przy okazji potwierdza, że pojedynczy bajt odpowiada osiemu bitom, które są najmniejszymi jednostkami informacji potrzebnymi do zakodowania, czy dane zdarzenie wystąpiło.

a drugi za dodatnie np. $(129-255)_{dec}$. Graficznie zostało to zobrazowane na rycinie 13, przy czym na osi odciętych wartości dziesiętne zastąpiono szesnastkowymi.

$00_{[hex]} = 00_{[dec]}$ $01_{[hex]} = 01_{[dec]}$ $02_{[hex]} = 02_{[dec]}$ $03_{[hex]} = 03_{[dec]}$ $04_{[hex]} = 04_{[dec]}$ $05_{[hex]} = 05_{[dec]}$ $06_{[hex]} = 06_{[dec]}$ $07_{[hex]} = 07_{[dec]}$	$08_{[hex]} = 08_{[dec]}$ $09_{[hex]} = 09_{[dec]}$ $0A_{[hex]} = 10_{[dec]}$ $0B_{[hex]} = 11_{[dec]}$ $0C_{[hex]} = 12_{[dec]}$ $0D_{[hex]} = 13_{[dec]}$ $0E_{[hex]} = 14_{[dec]}$ $0F_{[hex]} = 15_{[dec]}$	$10_{[hex]} = 16_{[dec]}$ $11_{[hex]} = 17_{[dec]}$ $12_{[hex]} = 18_{[dec]}$ $13_{[hex]} = 19_{[dec]}$ $14_{[hex]} = 20_{[dec]}$ $15_{[hex]} = 21_{[dec]}$ $16_{[hex]} = 22_{[dec]}$ $17_{[hex]} = 23_{[dec]}$	$18_{[hex]} = 24_{[dec]}$ $19_{[hex]} = 25_{[dec]}$ $1A_{[hex]} = 26_{[dec]}$ $1B_{[hex]} = 27_{[dec]}$ $1C_{[hex]} = 28_{[dec]}$ $1D_{[hex]} = 29_{[dec]}$ $1E_{[hex]} = 30_{[dec]}$ $1F_{[hex]} = 31_{[dec]}$
...			
$E0_{[hex]} = 224_{[dec]}$ $E1_{[hex]} = 225_{[dec]}$ $E2_{[hex]} = 226_{[dec]}$ $E3_{[hex]} = 227_{[dec]}$ $E4_{[hex]} = 228_{[dec]}$ $E5_{[hex]} = 229_{[dec]}$ $E6_{[hex]} = 230_{[dec]}$ $E7_{[hex]} = 231_{[dec]}$	$E8_{[hex]} = 232_{[dec]}$ $E9_{[hex]} = 233_{[dec]}$ $EA_{[hex]} = 234_{[dec]}$ $EB_{[hex]} = 235_{[dec]}$ $EC_{[hex]} = 236_{[dec]}$ $ED_{[hex]} = 237_{[dec]}$ $EE_{[hex]} = 238_{[dec]}$ $EF_{[hex]} = 239_{[dec]}$	$F0_{[hex]} = 240_{[dec]}$ $F1_{[hex]} = 241_{[dec]}$ $F2_{[hex]} = 242_{[dec]}$ $F3_{[hex]} = 243_{[dec]}$ $F4_{[hex]} = 244_{[dec]}$ $F5_{[hex]} = 245_{[dec]}$ $F6_{[hex]} = 246_{[dec]}$ $F7_{[hex]} = 247_{[dec]}$	$F8_{[hex]} = 248_{[dec]}$ $F9_{[hex]} = 249_{[dec]}$ $FA_{[hex]} = 250_{[dec]}$ $FB_{[hex]} = 251_{[dec]}$ $FC_{[hex]} = 252_{[dec]}$ $FD_{[hex]} = 253_{[dec]}$ $FE_{[hex]} = 254_{[dec]}$ $FF_{[hex]} = 255_{[dec]}$
$XY_{[hex]} = [X \cdot 10^1 + Y \cdot 10^0]_{[hex]} = [x \cdot 16^1 + y \cdot 16^0]_{[dec]}$ $D7_{[hex]} = [D \cdot 10^1 + 7 \cdot 10^0]_{[hex]} = [13 \cdot 16^1 + 7 \cdot 16^0]_{[dec]} = [13 \cdot 16 + 7]_{[dec]} = 215_{[dec]}$			

Ryc. 12. Sposób przeliczania wartości z systemu szesnastkowego na dziesiętny [opracowanie własne].



Ryc. 13. Sposób notacji znaków dla liczb szesnastkowych [opracowanie własne].

Druga okoliczność dotyczy zakresu pomiarowego akcelerometrów, który cechuje się sporą rozpiętością. Producenci stosują różne zakresy, jak również zróżnicowanie występuje w obrębie gamy produktowej tego samego wytwórcy. Przykłady możliwych zakresów pokazane są na rycinie 14.

MMA68xx, Dual-axis SPI Inertial Sensor

ORDERING INFORMATION*				
Device	X-axis Range	Y-axis Range	Package	Shipping
MMA6811BKCW	±60 g	±25 g	98ASA00690D	Tubes
MMA6813BKCW	±50 g	±50 g	98ASA00690D	Tubes
MMA6821BKCW	±120 g	±25 g	98ASA00690D	Tubes
MMA6823BKCW	±120 g	±60 g	98ASA00690D	Tubes
MMA6825BKCW	±100 g	±100 g	98ASA00690D	Tubes
MMA6826BKCW	±60 g	±60 g	98ASA00690D	Tubes
MMA6827BKCW	±120 g	±120 g	98ASA00690D	Tubes
MMA6811BKTW	±60 g	±25 g	98ASA00090D	Tubes
MMA6813BKTW	±50 g	±50 g	98ASA00090D	Tubes
MMA6821BKTW	±120 g	±25 g	98ASA00090D	Tubes
MMA6823BKTW	±120 g	±60 g	98ASA00090D	Tubes
MMA6825BKTW	±100 g	±100 g	98ASA00090D	Tubes
MMA6826BKTW	±60 g	±60 g	98ASA00090D	Tubes
MMA6827BKTW	±120 g	±120 g	98ASA00090D	Tubes
MMA6811BKCWR2	±60 g	±25 g	98ASA00690D	Tape & Reel
MMA6813BKCWR2	±50 g	±50 g	98ASA00690D	Tape & Reel
MMA6821BKCWR2	±120 g	±25 g	98ASA00690D	Tape & Reel

BOSCH Products

Type	Range	Sens. axes	Sensitivity
SMA550	±35 g	X	13.75 LSB/g
	±48 g		10 LSB/g
	±70 g		6.875 LSB/g
	±96 g		5 LSB/g
SMA560	±35 g	X, Y	13.75 LSB/g
	±48 g		10 LSB/g
	±70 g		6.875 LSB/g
	±96 g		5 LSB/g

ANALOG DEVICES ADXL278

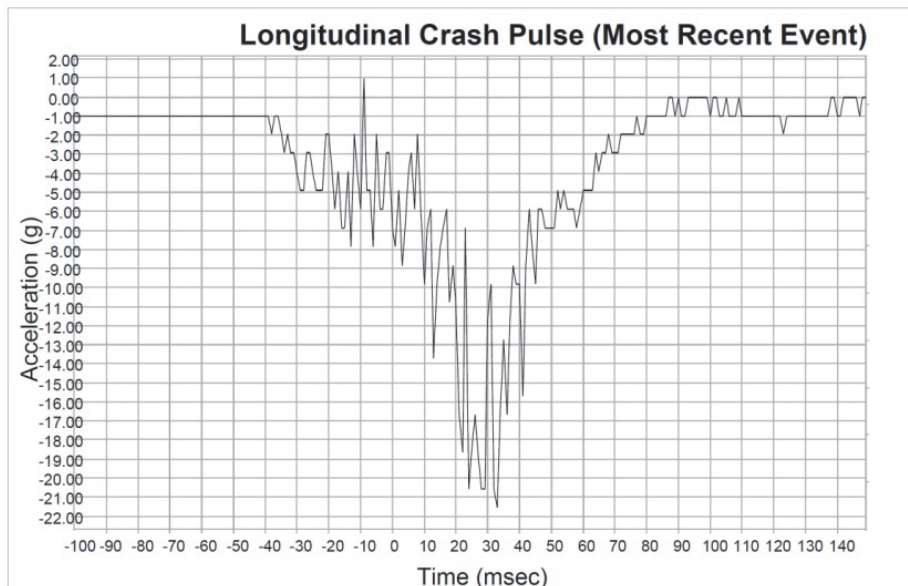
Parameter	Conditions	Model No. ADXL278A			Model No. ADXL278S			Model No. ADXL278E			Unit	
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max		
SENSE												
Output Full-Scale Range	$I_{FS} \pm 100 \mu A$	37			55			X	70	37	g	
Nonlinearity		0.2	2		0.2	2		0.2	2		%	
Package Alignment Error		1			1			1			Degree	
Sensor-to-Sensor Alignment Error		0.1			0.1			0.1			Degree	
Cross-Axis Sensitivity		-5	24	+5	-5	24	+5	-5	24	+5	%	
Resonant Frequency											kHz	
Sensitivity, Ratiometric (Over Temperature)	$V_{CC} = 5V, 100 Hz$	52.25	55	57.75	36.1	38	39.9	X	25.05	27	28.35	mV/g
								Y	52.25	55	57.75	mV/g

Ryc. 14. Zakresy pomiarowe czujników przyspieszeń różnych producentów [1, 10, 12].

Jeżeli w danym sterowniku napotkamy czujniki o zakresie pomiarowym $\pm 70g$ lub $\pm 120g$, to wartość pojedynczego bajtu pamięci będzie wprost odpowiadała wartości opóźnienia. W przypadku czujników o mniejszym zakresie (poniżej $\pm 65g$), należy liczyć się z tym, że obydwie wartości będą względem siebie w relacji 2:1. Informacje na temat parametrów konkretnego akcelerometru użytego w badanym sterowniku, które pozwalają ocenić, jakie graniczne wartości opóźnień mogły zostać zarejestrowane, można odnaleźć w jego karcie katalogowej (*data sheet*). Karta katalogowa dostarcza także informacji na temat ilości kierunków pomiarowych. W samochodowych systemach bezpieczeństwa biernego przy zderzeniach wykorzystywane są najczęściej akcelerometry dwukierunkowe, mierzące opóźnienia na kierunku wzdłużnym i poprzecznym względem osi podłużnej pojazdu, aczkolwiek rozwiązania bazujące na dwóch jednokierunkowych czujnikach także są możliwe.

Pamięci EEPROM mają pojemność rzędu kilku kilobajtów [kB], co w praktyce oznacza, że do przebadania mamy kilkadziesiąt linii adresowych zapisu szesnastkowego. Niestety nie ma jednego gotowego rozwiązania pozwalającego ustalić, pod jakimi adresami zostały zapisane wartości opóźnień. Przeszukując bufor można jednak kierować się kilkoma praktycznymi wskazówkami, które z pewnością ułatwią to zadanie. Pierwsza i najważniejsza wynika wprost z mechaniki zderzeń. Blok danych szesnastkowych odpowiadający impulsowi uderzenia zawsze na początku i końcu swojego zakresu będzie posiadał znikome wartości opóźnień (**00_{hex}** lub **FF_{hex}**). Z kolei wartości maksymalne będą zlokalizowane w środku

przedziału. Dokładnie tak samo wygląda to w raportach CDR, których algorytmy bazują na analogicznej zasadzie, jak metodyka postępowania omawiana w niniejszym artykule. Zapis opóźnień uzyskany w przykładowym odczycie danych wypadkowych CDR, a więc już po konwersji HEX-DEC, pokazany jest na rycinie 15.



Ryc. 15. Przebieg zmian opóźnienia z przykładowego raportu CDR.

Druga z istotnych wskazówek dotyczy wielkości obszaru poszukiwanych danych. Tutaj całkowitą pewność dawałaby nam wyłącznie znajomość kodu algorytmu znajdującego się w pamięci rozkazów mikrokontrolera, ale ta jest na ogół zaszyfrowana i dostęp do niej bez zaawansowanej wiedzy z zakresu inżynierii wstecznej⁸ jest praktycznie niemożliwy. Pewien pogląd na sprawę mogą nam dać zapisy rozporządzenia 49 CFR 536⁹, z których wynika, że opóźnienia na potrzeby rejestracji danych wypadkowych EDR są zapisywane co 1 ms (milisekundę). Pamiętać należy, że w przypadku analizy danych pozyskiwanych ze sterowników poduszek gazowych z pojazdów sprzed ery EDR, wnioskowanie bazujące na tych przepisach może okazać się zawodne. Niemniej jednak warto zauważyć, że przed tą erą systemy bezpieczeństwa biernego funkcjonowały w samochodach z powo-

⁸ Ang. *reverse engineering*.

⁹ CFR – ang. *Code of Federal Regulation*, kodeks przepisów federalnych Stanów Zjednoczonych obejmujących każdą dziedzinę życia. Numer 49 przypisany jest do transportu.

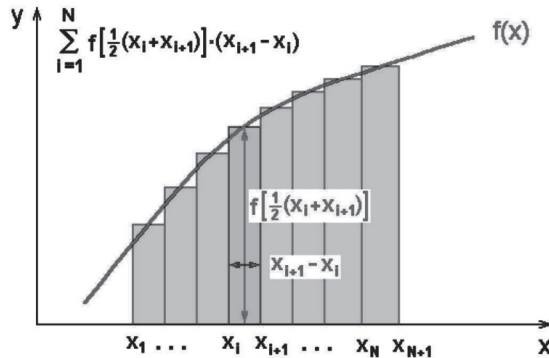
dzeniem od co najmniej dwóch dekad, a wprowadzone później systemy EDR stanowią tylko ich uzupełnienie. Niewykluczone zatem, że sposób pomiaru opóźnień odbywał się i odbywa się cały czas tak samo.

Dodatkowe wnioskowanie można oprzeć także na szacunkowym czasie trwania impulsu uderzenia. Oczywiście dla każdego zderzenia będzie on inny, ale w ogólnym zarysie można stwierdzić, że najczęściej nie przekracza on około 150 milisekund. Jeżeli rozszerzyć go z góry i z dołu o dodatkowe 50 milisekund, kiedy przyspieszenia są bliskie zeru, to otrzymujemy przedział 250 milisekund, co całkiem dobrze koresponduje z zapisami regulacji 49 CFR 563 na temat minimalnego zakresu czasu zapisu danych poprzedzającego chwilę aktywacji poduszek gazowych. To także może stanowić przesłankę, że rejestracja opóźnień i przyspieszeń następuje co 1 ms.

W świetle tych spostrzeżeń poszukiwane bloki danych powinny mieć wielkość od 150 do 250 bajtów, oczywiście jeżeli brać pod uwagę wartości na jednym kierunku pomiarowym. Zważywszy, że w przypadku zderzeń pomiar odbywa się na dwóch, należałoby je rozszerzyć do zakresu od 300 do 500 bajtów. Biorąc pod uwagę fakt, że jedna linia adresowa składa się z 16 bajtów, interesujący nas blok danych powinien zawierać od 19 do 32 linii, przy czym doświadczenie pokazuje, że w praktyce faktyczna ich liczba jest zbliżona do dolnej wartości z podanego zakresu.

Jeżeli uda nam się skutecznie wydzielić z pamięci EEPROM grupę danych spełniającą opisane powyżej kryteria, to dysponujemy materiałem pozwalającym obliczyć zmianę prędkości pojazdu w trakcie zderzenia. Pamiętać należy, że pozyskane dane są danymi surowymi i trzeba je przefiltrować. Dobre rezultaty uzyskujemy z wykorzystaniem filtrów CFC¹⁰, mających między innymi zastosowanie w programie PC-Crash. Informacje na temat sposobu filtrowania można znaleźć np. w publikacji SAE J211 [14], gdzie zdefiniowano różne klasy częstotliwości kanałów CFC, które należy stosować w zależności od typu sygnału. Po przefiltrowaniu opóźnień pozostaje do wykonania ostatni krok, czyli ich scałkowanie. Dane dyskretne całkujemy numerycznie i mamy do wyboru kilka metod: metodę prostokątów, trapezów, metodę Simpsona lub Monte Carlo. Przykład całkowania metodą prostokątów pokazany jest na rycinie 16.

¹⁰ CFC – ang. Chanel Frequency Classes, klasy częstotliwości kanału.



Ryc. 16. Całkowanie numeryczne metodą prostokątów [11].

Należy pamiętać o rozdzieleniu danych i całkować opóźnienia osobno dla każdego z kierunków. W ten sposób otrzymamy zmiany prędkości na kierunku wzdłużnym i poprzecznym, które na końcu możemy zsumować geometrycznie, co pozwoli określić wypadkową zmianę prędkości w ujęciu wektorowym. Uzyskany w ten sposób wynik można zweryfikować porównując go z prędkością energetycznie równoważną EES, ale należy pamiętać, że parametry Δv i EES nie są tożsame. Równość pomiędzy nimi zachodzi w kilku szczególnych przypadkach, na przykład przy w pełni plastycznym uderzeniu pojazdu w sztywną nieodkształcalną przeszkodę, gdy nie dochodzi do odbicia. W zdecydowanej większości zdarzeń mniejsze lub większe różnice występują, niemniej jednak nawet takie porównanie może stanowić pomocniczy punkt odniesienia, pozwalający stwierdzić, czy wartość Δv została określona prawidłowo.

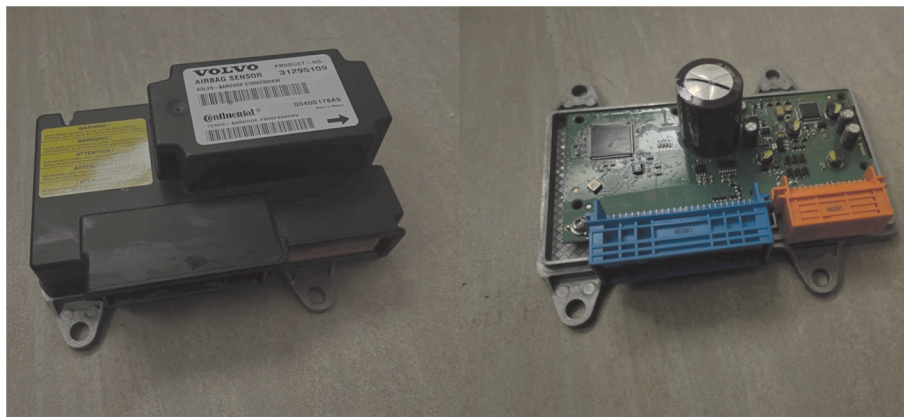
7. Praktyczne zastosowanie metody

Na drodze dwujezdniowej o wydzielonych dwóch pasach ruchu dla każdego z kierunków doszło do zderzenia samochodu osobowego marki Volvo C30 z ciągnikiem siodłowym, którego kierowca oczekiwał na możliwość wjechania z drogi podporządkowanej. Na krótko przed zderzeniem samochód Volvo poruszał się lewym pasem ruchu, natomiast kierowca nadjeżdżającego z przeciwną drugą jezdnią innego pojazdu ciężarowego podjął manewr skrętu w lewo i w ten sposób doprowadził do powstania zagrożenia w ruchu drogowym. Kierujący Volvo po dostrzeżeniu zagrożenia podjął obronny manewr skrętu w prawo – zjechał na prawy pas, a następnie poza prawą krawędź jezdni w następstwie czego uderzył w stojący na drodze podporządkowanej ciągnik siodłowy. Sytuację w chwili uderzenia pokazano na ryc. 17, stanowiącej wykadrowaną część klatki nagrania, jakie zarejestrowała kamera samochodowa jednego ze świadków.



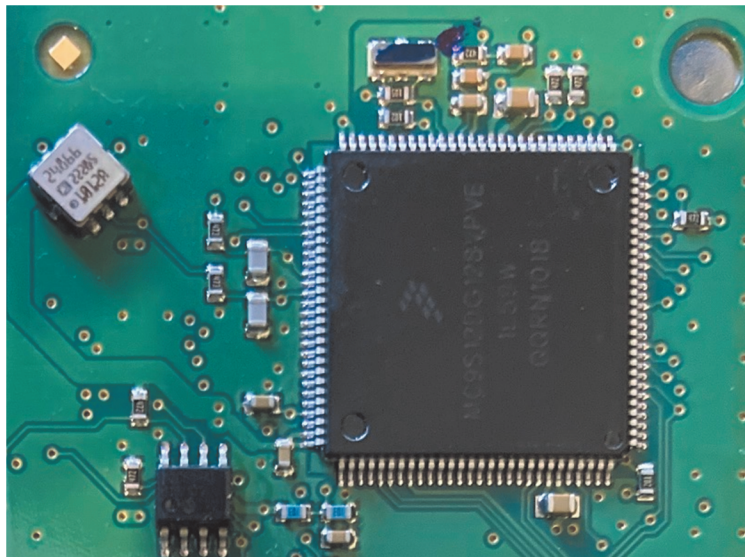
Ryc. 17. Początkowa faza uderzenia samochodu osobowego Volvo C30 w ciągnik siodłowy.

W sprawie udało się zdemontować sterownik poduszek gazowych z samochodu osobowego. Był to sterownik wyprodukowany przez firmę Continental o numerze katalogowym 31295109. Jego widok przed i po zdjęciu obudowy przedstawiono na rycinie 18.



Ryc. 18. Sterownik poduszek gazowych z samochodu Volvo C30.

Ściągnięcie obudowy pozwoliło na identyfikację kluczowych elementów odpowiedzialnych za sterowanie pracą układu poduszek gazowych i napinaczy pasów bezpieczeństwa. Pierwszym z nich był akcelerometr AD 22285 natomiast drugim mikrokontroler MC9S12DG128. Obydwa elementy przedstawiono w powiększeniu na rycinie 19.



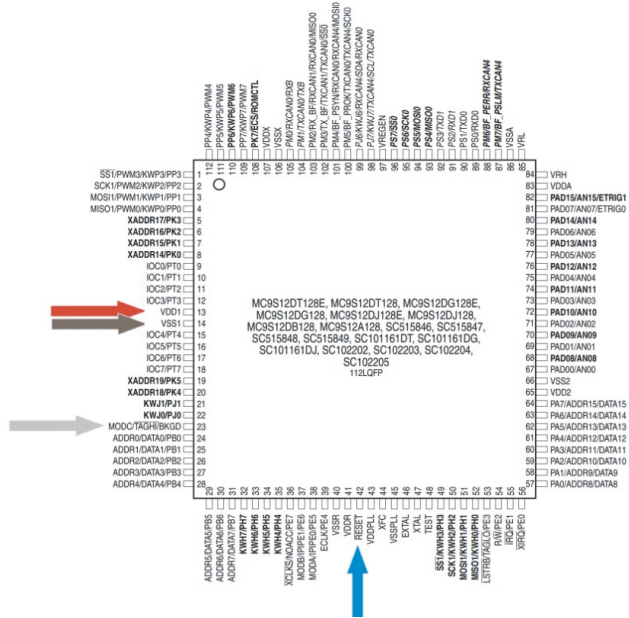
Ryc. 19. Akcelerometr AD22285 oraz mikrokontroler MC9S12DG128 odpowiedzialne za pracę układu poduszek gazowych w Volvo C30.

Na podstawie karty katalogowej akcelerometru ustalono, że mierzył on opóźnienia w dwóch kierunkach, a jego zakres pomiarowy na każdym z nich wynosił $\pm 55g$. Fragment karty katalogowej pokazany jest na rycinie 20.

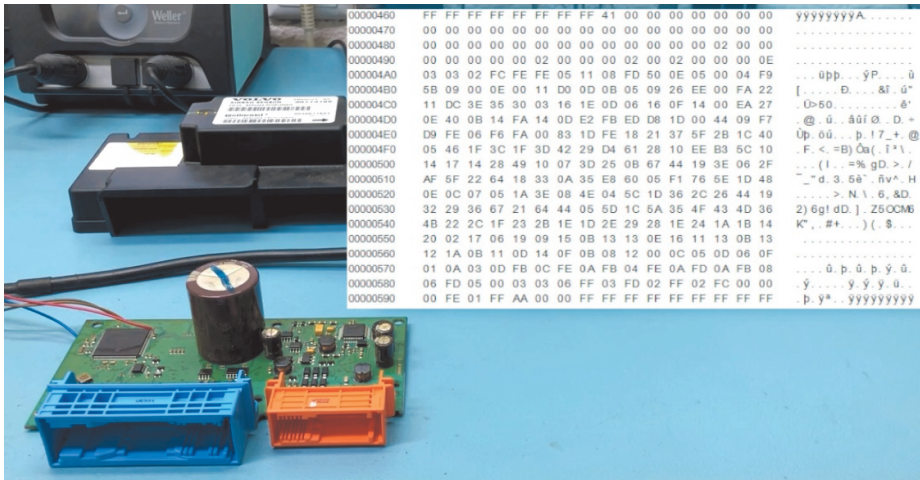
ANALOG DEVICES		ADXL278											
		Model No. AD22284			Model No. AD22285			Model No. AD22286				Unit	
Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Axis	Min	Typ	Max		
SENSOR													
Output Full-Scale Range	$I_{OUT} \leq \pm 100 \mu A$	37			55			X	70				g
								Y	37				g
Nonlinearity		0.2 2			0.2 2					0.2	2		%
Package Alignment Error		1			1					1			Degree
Sensor-to-Sensor Alignment Error		0.1			0.1					0.1			Degree
Cross-Axis Sensitivity		-5 +5			-5 +5				-5		+5		%
Resonant Frequency		24			24					24			kHz
Sensitivity, Ratiometric (Over Temperature)	$V_{DD} = 5 V, 100 Hz$	52.25	55	57.75	36.1	38	39.9	X	25.65	27	28.35		mV/g
								Y	52.25	55	57.75		mV/g

Ryc. 20. Wyciąg z karty katalogowej czujnika opóźnienia AD22285 z rodziny ADXL278 [1].

Z kolei karta katalogowa mikrokontrolera dostarczyła informacji, że w jego bloku pamięci została wydzielona pamięć nieulotna EEPROM o pojemności 2 kilobajtów, a dane były w niej zapisywane pod adresami \$0000-\$07FF. Wyciąg z karty tego układu przedstawiono na rycinie 21.



Ryc. 22. Schemat podłączenia mikrokontrolera do odczytu pamięci EEPROM.



Ryc. 23. Połączenie przewodów programatora z nóżkami (pinami) mikrokontrolera i odczyt pamięci.

Na tej podstawie wydzielono blok surowych danych odnoszących się do opóźnień, który przekonwertowano z wartości heksadecymalnych na dziesiętne. Efekt tych czynności jest pokazany na rycinie 24.

0	0	0	0	0	0	0	0	0	-32,5	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0
0	0	0	0	0	0	-1	0	0	-1	0	-1	0	0	0
-1,5	-1,5	-1	1,5	0,5	0,5	-2,5	-8,5	-4	1	-40	-7	-2,5	0	-2
-45,5	-4,5	0	-7	0	-8,5	23,5	-6,5	-5,5	-2,5	-4,5	-19	8,5	0	2,5
-8,5	17,5	-31	-26,5	-24	-7	-11	-15	-6,5	-3	-11	-7,5	-10	0	10,5
-7	-32	-5,5	-10	2,5	-10	-6,5	14,5	2	16,5	19,5	-14,5	0	-34	-4,5
19	0,5	-3	4,5	2,5	0	62	-14,5	0,5	-12	-16,5	-27,5	-47,5	-21,5	-14
-2,5	-35	-15,5	-30	-15,5	-30,5	-33	-20,5	21,5	-48,5	-20	-8	8,5	38	-46
-10	-11,5	-10	-20	-36,5	-8	-3,5	-30,5	-18,5	-5,5	-51,5	-34	-12,5	-31	-3
40	-47,5	-17	-50	-12	-25,5	-5	-26,5	11,5	-48	-2,5	7	-59	-47	-14,5
-7	-6	-3,5	-2,5	-13	-31	-4	-31	-2	-46	-14,5	-27	-22	-19	-34
-25	-20,5	-27	-51,5	-16,5	-50	-34	-2,5	-46,5	-14	-45	-26,5	-39,5	-33,5	-38,5
-37,5	-17	-22	-15,5	-17,5	-21,5	-15	-14,5	-23	-20,5	-20	-15	-18	-13	-13,5
-16	-1	-11,5	-3	-12,5	-4,5	-10,5	-2,5	-9,5	-9,5	-7	-11	-8,5	-9,5	-5,5
-9	-13	-5,5	-8,5	-6,5	-10	-7,5	-5,5	-4	-9	0	-6	-2,5	-6,5	-3
-0,5	-5	-1,5	-6,5	2	-6	0,5	-5	2	-2	0,5	-5	1	-5	2
1,5	-2,5	1	-2,5	0	-1,5	-1,5	-3	0	-1,5	1	-1	0	-1	1,5
0	0	0,5	-0,5	0	42,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Ryc. 24. Blok wartości opóźnień zapisanych przez sterownik w chwili zderzenia.

Wartości te rozgrupowano zgodnie z kierunkami mierzonych opóźnień, tj. równoległe i prostopadłe do osi wzdłużnej samochodu, następnie przefiltrowano, po czym scałkowano numerycznie w przedziale czasu 0–150 milisekund i wyznaczono wartość wypadkową wg następujących formuł:

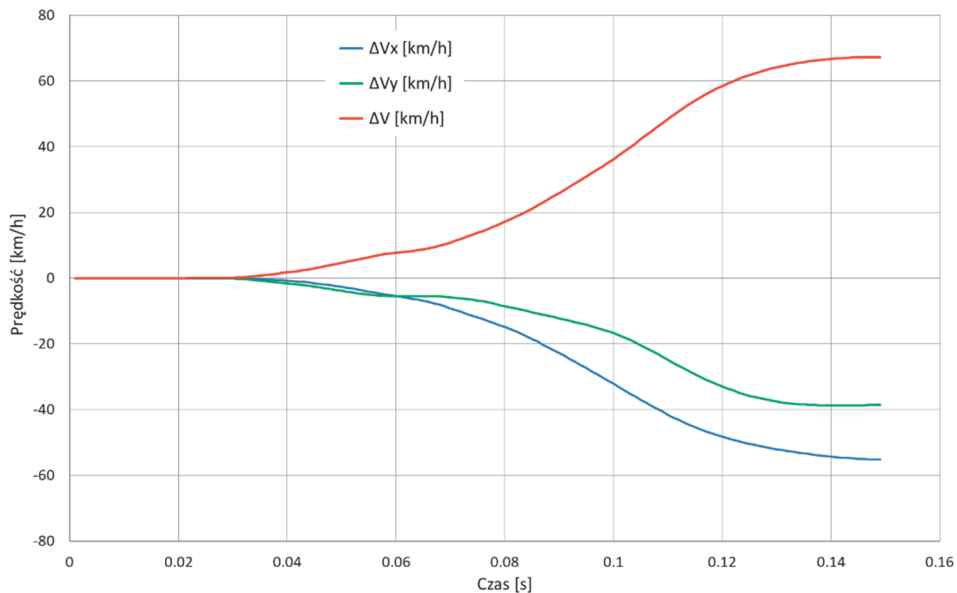
$$\Delta v_x = \int_0^{150} a_x dt = -15,61 \frac{m}{s} \quad \text{tj.} \quad -56 \frac{km}{h}$$

$$\Delta v_y = \int_0^{150} a_y dt = -10,92 \frac{m}{s} \quad \text{tj.} \quad -39 \frac{km}{h}$$

$$\Delta v = \sqrt{\Delta v_x^2 + \Delta v_y^2} = 19,05 \frac{m}{s} \quad \text{tj.} \quad 69 \frac{km}{h}$$

Z obliczeń wynikało, że zmiana prędkości Volvo C30 w wyniku uderzenia w ciągnik siodłowy wynosiła około 69 km/h. Graficzna postać tych obliczeń pokazana jest na rycinie 25.

Zebrany w sprawie materiał dowodowy wskazywał na to, że samochód Volvo po uderzeniu w ciągnik siodłowy przemieścił się za skrzyżowanie. Pozycje pojazdów po wypadku widoczne są na rycinie 26.

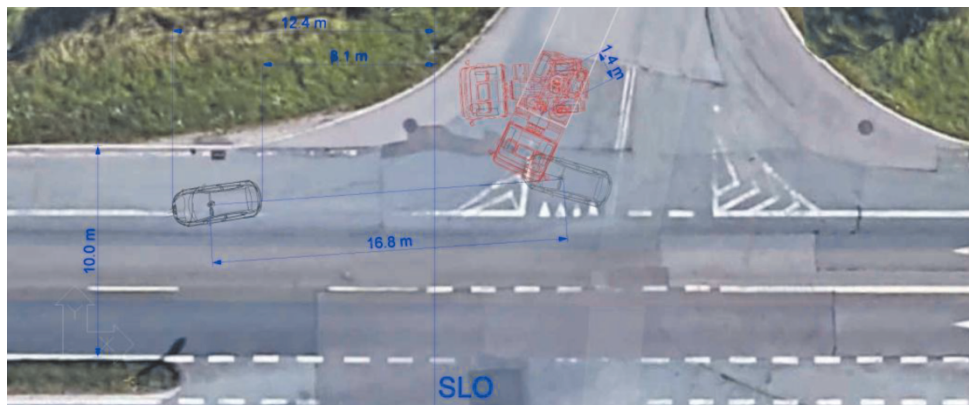


Ryc. 25. Graficzna zmiana prędkości Volvo C30 w następstwie zderzenia.



Ryc. 26. Usytuowanie pojazdów po zderzeniu.

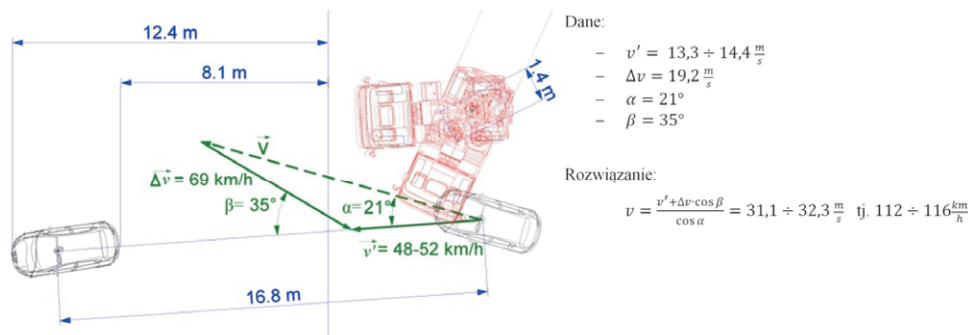
Powypadkowe położenia pojazdów oraz ślady na jezdni zostały zwymiarowane przez policję, co pozwoliło ustalić, że samochód Volvo przemieścił się w ruchu pozderzeniowym na odległość ok. 16,8 m. Stan powypadkowy wraz z konfiguracją kolizyjną w widoku z góry pokazano na rycinie 27.



Ryc. 27. Stan powypadkowy wraz z usytuowaniem pojazdów w chwili zderzenia.

Na tej podstawie, bazując na współczynnikach Marquarda, prędkość na początku ruchu pozderzeniowego samochodu Volvo ustalono na ok. 48–52 km/h.

W ostatnim etapie czynności analitycznych wykorzystano zależność wektorową łączącą prędkość kolizyjną \vec{v} z prędkością ruchu pozderzeniowego \vec{v}' i zmianą prędkości $\Delta\vec{v}$, co przedstawiono na początku artykułu. Efekt tej analizy przedstawiono na rycinie 28.



Ryc. 28. Ostatni etap obliczeń prowadzący do określenia prędkości kolizyjnej Volvo C30.

Rozwiązanie przedstawionego trójkąta prędkości doprowadziło ostatecznie do określenia prędkości kolizyjnej samochodu osobowego – zawierała się ona w przedziale 112–116 km/h.

8. Podsumowanie

Artykuł przedstawia alternatywne podejście ustalania prędkości kolizyjnej samochodu, w którym wykorzystać można informacje o zmianie jego prędkości wyznaczonej na podstawie wartości opóźnień i przyspieszeń zapisanych przez sterownik poduszek gazowych w trakcie zderzenia. Samo wyznaczenie zmiany prędkości jest niewystarczające do przeprowadzenia skutecznego procesu rekonstrukcyjnego. Równie ważną rolę odgrywa składnik związany z ruchem samochodu po zderzeniu i musi on zostać uwzględniony.

Niekwestionowaną zaletą metody jest to, że opóźnienia i przyspieszenia są wyznaczone przez systemy bezpieczeństwa biernego pojazdu w sposób niezależny od biegłego. Jeżeli wykonane na ich podstawie obliczenia doprowadzą do takiej samej wartości prędkości kolizyjnej, jak na drodze klasycznej rekonstrukcji, może to stanowić silną przesłankę wskazującą na prawidłowość ustaleń dotyczących przebiegu zdarzenia.

Poważną przeszkodą w rozwijaniu tej metody może okazać się konieczność rozbudowania warsztatu biegłego o narzędzia, z którymi być może nie miał do tej pory styczności, sfinansowanie ich zakupu oraz nauczanie się ich obsługi.

Niewykluczone, że wraz z coraz powszechniejszym odczytem danych wypadkowych EDR zaprezentowana metoda przyczyni się do walidacji hipotez Marquarda, Burga i McHenry'ego dotyczących ruchu pozderzeniowego, co w efekcie przełoży się na zredukowanie stopnia niepewności całego procesu obliczeniowego bazującego na klasycznych metodach rekonstrukcyjnych wykorzystywanych przy ustalaniu parametrów zderzenia z udziałem starszych pojazdów.

Bibliografia

1. Analog Devices. (2010). *Dual-Axis, High-g, iMEMS® Accelerometers ADXL278*. Dokumentacja techniczna producenta.
2. Borkowski, P. (2013). *Przygoda z elektroniką*. Wydawnictwo HELION.
3. Freescale Semiconductors Inc. (2002). *Motorola Semiconductor Technical Data MC9S12D Family*. Dokumentacja techniczna producenta.
4. Ginter, J. (2008). *Nie bój się pochodnej*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne.
5. Gonet, M. (2010). *Excel w obliczeniach naukowych i technicznych*. Wydawnictwo HELION.
6. Górecki, P. (2004). *Układy cyfrowe – pierwsze kroki*. Wydawnictwo BTC.
7. Grajek, M., Gralewski, L. (2009). *Narodziny kryptologii matematycznej*. Wydawnictwo Naukowe Semper.
8. Mostowski, A. W. (1964). *Algebry Boole'a i ich zastosowania*. Państwowe Wydawnictwo Naukowe.
9. National Highway Traffic Safety Administration. (2006). *Event Data Recorders (49 CFR 563)*.
10. NXP Semiconductors. (2016). *MMA68xx, Dual-axis SPI Inertial Sensor*. Dokumentacja techniczna producenta.

11. Pawełczyk, M. (2000). *Całka oznaczona – metoda trapezów*. http://marpaw.elisa.pl/wsti/roznosci/calka/int-pp/int_t-1.htm
12. Robert Bosch GmbH. (2016). *High-g acceleratomeres for passive safety applications SMB46x*. Dokumentacja techniczna producenta.
13. Rokosch, U. (2003). *Poduszki gazowe i napinacze pasów*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności.
14. SAE International. (1995). *Surface Vehicle Recommended Practice – Instrumentation for Impact Test, (J211)*.
15. Solomon, K., Kendall, J. (2014). *Airbag Deployment Criteria*. <https://www.experts.com/content/articles/Kenneth-Solomon-Airbag-Paper.pdf>
16. Świder, P. (2006). Pojazdy. Mechanika ruchu samochodu. W: J. Wierciński, A. Reza (red.), *Wypadki drogowe. Vademecum biegłego sądowego* (s. 340–346). Wydawnictwo Instytutu Ekspertyz Sądowych.
17. Tyszer, J., Mrugalski, G., Popiel, A., Czysz, D. (2016). *Technika cyfrowa – zbiór zadań z rozwiązaniami*. Wydawnictwo BTC.
18. Wrotek, W. (2023). *Układy cyfrowe – Elektronika bez oporu*. Wydawnictwo HELION.

* * *

The use of data recorded in the airbag control module in the reconstruction of road traffic accidents

Abstract

Modern cars are increasingly equipped with event data recorders. Their readout is a very valuable source of information, as it supports the reconstruction process conducted on the basis of traditional analytical methods. Owing to devices such as CDR Bosch or ADW Axes, it is simple and fast because the communication between the reading device and the controller memory takes place automatically via a standard on-board diagnostic connection (OBD), or, if it is necessary to dismantle the controller from the vehicle, via an additional communication interface. The examination conducted in this way does not require any complicated preparations. However, there is still a large group of older vehicles which, despite gathering information on decelerations or accelerations during a collision, do not provide the possibility of reading them out. The article proposes an approach to obtaining this type of data, their interpretation and use in the reconstruction process.

Key words

Deceleration, Δv , EES, airbag control module, microcontroller, EEPROM, accelerometer, programmer, digital data.