



Wpływ niepewności pomiarów i przyjmowanych wartości wielkości fizycznych na wnioskowanie w ekspertyzach z zakresu analizy i rekonstrukcji wypadków drogowych

Wstęp i cel pracy

Zjawiska zachodzące w przyrodzie opisywane są za pomocą wielkości fizycznych. Część z nich – wielkości podstawowe – podlega bezpośrednim pomiarom dokonywanym za pomocą różnych urządzeń, inne są na podstawie wielkości mierzonych obliczane z użyciem stosownych formuł matematycznych (tzw. pomiar pośredni). Takie wielkości określane są mianem wielkości mierzalnych. Przykładami podstawowych mierzalnych wielkości fizycznych, występujących w analizie i rekonstrukcji wypadku drogowego, są: długość śladów hamowania lub blokowania kół pojazdu, wielkość odkształceń nadwozia pojazdu, prędkość czy przyspieszenie. Z oczywistych względów ekspert zajmujący się rekonstrukcją wypadku najczęściej otrzymuje wyniki pomiarów długości/odległości – takich pomiarów dokonuje się podczas oględzin miejsc zdarzeń. Innymi wielkościami są wielkości niemierzalne – takie, których dla konkretnego przypadku nie sposób zmierzyć, choćby dlatego, że nie ma możliwości stworzenia powtarzalnych warunków pomiaru albo wartości te silnie zależą od indywidualnych cech podmiotu badań. Wielkości te podlegają rozkładowi statystycznym i do ich określenia stosuje się inne metody aniżeli w stosunku do wartości mierzalnych. Sztandarowym przykładem takich wielkości jest czas reakcji kierowcy lub prędkość ruchu osoby pieszej w chwili zdarzenia.

Z wartościami wielkości fizycznych nieodłącznie związane jest występowanie niepewności. Głównym źródłem wiedzy o niepewności pomiaru jest wydany w 1993 r. (i poprawiony w 1995 r.) przez International Standard Organization (ISO) *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, przetłumaczony na język polski i wydany przez Główny Urząd Miar pod tytułem „Wyrażanie niepewności pomiaru. Przewodnik” (norma ta została przyjęta w Polsce w 1999 r.). Według tej pozycji niepewność to „parametr, związany z wynikiem pomiaru, charakteryzujący rozrzut war-

tości, które można w uzasadniony sposób przypisać wielkości mierzonej”. W odróżnieniu od błędu, określanego jako odchylenie od wartości rzeczywistej (czysto teoretycznej), niepewność zdefiniowana jest względem wyniku pomiaru. Często jednak spotyka się zamienne stosowanie obu pojęć. Rachunek niepewności polega na określeniu, jak duże są niedokładności wyników bezpośredniego pomiaru i obliczeń oraz wskazaniu ewentualnego sposobu ich zmniejszania.

W opiniowaniu wypadków drogowych nacisk na analizę niepewności pojawił się stosunkowo niedawno – najpoważniejszym krokiem w tym kierunku było symposium EVU¹, które odbyło się w Krakowie w 2007 r. Jak dotąd jednak w opiniach wciąż raczej unika się tego tematu, a absolutnym wyjątkiem są takie, w których wprost przeprowadzono analizę niepewności i wskazano choćby przybliżony poziom dokładności uzyskanych wyników.

Niniejsza praca ma na celu poruszenie kwestii niepewności wyników uzyskiwanych w trakcie opracowywania opinii z zakresu badań wypadków drogowych, przedstawienie podstawowych zasad analizy wyników pomiarów i wskazanie przykładowych zastosowań analizy niepewności w konkretnych metodach związanych z rekonstrukcją wypadku drogowego.

Pomiary wielkości fizycznych

Pomiar wielkości fizycznej polega na porównaniu jej z wielkością tego samego rodzaju przyjętą za jednostkę. Wynik takiego pomiaru musi zawsze składać się z wartości liczbowej i jednostki.

Pomiary wartości fizycznych można podzielić na:

- bezpośrednie – dokonywane są wprost za pomocą jednego przyrządu pomiarowego;
- pośrednie – mierzona wielkość otrzymuje się ze wzoru matematycznego, w którym występują wartości mierzone bezpośrednio.

Analiza niepewności pomiarów

Otrzymane z pomiarów wyniki nie dają prawdziwych wartości mierzonej wielkości, tylko wartość przybliżoną (estymatę). Różnicę pomiędzy rzeczywistą wartością mierzonej wielkości a wartością przybliżoną otrzymaną na drodze pomiarowej nazywa się niepewnością bezwzględną, której zapis matematyczny podano poniżej (1):

$$\Delta x = X - x_0 \quad (1)$$

gdzie:

X – rzeczywista wartość mierzonej wielkości;

x_0 – wartość przybliżona otrzymana z pomiarów.

W praktyce zdefiniowanie niepewności bezwzględnej nie jest przydatne. Podczas przeprowadzania obliczeń ważniejsze jest jak najdokładniejsze określenie wartości rzeczywistej X . Równanie po przekształceniu ma postać (2):

$$X = x_0 \pm \Delta x \quad (2)$$

Symbol „ $\pm$ ” wprowadzono, gdyż wynik pomiaru wskutek wystąpienia niedokładności może być zawyżony lub заниżony.

Wartości niepewności bezwzględnej Δx w pomiarach bezpośrednich można określać na podstawie danych technicznych podawanych w specyfikacji urządzenia pomiarowego. Jeżeli nie dysponuje się takimi informacjami, można przyjąć jednostkę najmniejszego rzędu wskazywaną przez urządzenie pomiarowe.

Oprócz dokładności pomiarowej urządzenia na wartość niepewności bezwzględnej ma również wpływ zastosowana metoda pomiarowa. Dokonując pomiaru np. długości śladów blokowania kół na jezdni za pomocą miary zwijanej, odczytu można dokonywać teoretycznie z dokładnością najmniejszej podziałki elementarnej – 1 cm. Jednak mierzący tak naprawdę dokonuje dwóch odczytów: pierwszy odczyt następuje w chwili ustawienia linii zerowej tak, aby pokrywała się ona z początkiem mierzonego odcinka, drugi podczas odczytu wartości długości odcinka. Taka metoda pomiaru ma wpływ na wartość niepewności bezwzględnej, która może się okazać większa niż dokładność najmniejszej podziałki miary zwijanej.

Niepewność bezwzględna zawsze powinna być podawana w jednostkach takich samych jak wartość mierzona.

Bardzo często w obliczeniach chodzi o ustalenie, w jakim stopniu na obliczone wartości ma wpływ niepewność pomiaru. Aby można było określić wpływ niepewności bezwzględnej na wykonany pomiar, stosuje się tak zwaną niepewność względną, która definiowana

jest jako stosunek niepewności bezwzględnej do wartości zmierzonej wielkości fizycznej. Zapis matematyczny niepewności względnej podanej w procentach przedstawiono poniżej (3):

$$\delta = \frac{\Delta X}{X} \cdot 100\% \quad (3)$$

gdzie:

ΔX – niepewność bezwzględna;

X – wartość zmierzona wielkości fizycznej.

Przyczyny powstawania niepewności pomiaru wielkości fizycznej

Istnieje wiele źródeł niepewności pomiaru, wśród nich są w szczególności:

- niepełna definicja wielkości mierzonej;
- niedoskonała realizacja definicji wielkości mierzonej;
- niereprezentatywne próbkowanie – próbka mierzona może nie reprezentować wielkości mierzonej;
- wpływ czynników zewnętrznych (również niedoskonały pomiar warunków otoczenia);
- rozdzielczość przyrządów pomiarowych (w tym też skończona ich czułość oraz subiektywne błędy w odczytywaniu wskazań);
- przybliżenia i założenia wynikające z metody pomiarowej;
- niedokładność wzorców i wartości przypisanych materiałom odniesienia;
- niedokładne wartości stałych i innych parametrów otrzymywanych ze źródeł zewnętrznych do pomiaru, a używanych w procedurze przetwarzania danych;
- zmiany w powtarzanych obserwacjach wielkości mierzonej w pozornie identycznych warunkach.

Niepewności pomiaru wielkości fizycznych ze względu na przyczyny ich powstawania można podzielić na:

- grube (pomyłki), które powstają wskutek niestaranności lub nieuwagi osoby obserwującej przyrząd pomiarowy i zapisującej wyniki pomiarów, lub też wywołane zmianą warunków, w których dokonywane są pomiary;
- przypadkowe, spowodowane przyczynami na ogół nieprzewidywalnymi i niemożliwymi do uniknięcia. Może to być wpływ otoczenia, zakłócenia w pracy urządzeń pomiarowych, które powodują, że wielokrotny pomiar tej samej wielkości fizycznej w tych samych warunkach daje wyniki nieznacznie różniące się od siebie;

- systematyczne – są one spowodowane niedokładnością przyrządów pomiarowych, jak również niedokładnie sprecyzowanymi metodami pomiarowymi. Błędy te należy uwzględniać w prezentacji wyników w postaci odpowiednich poprawek.

W analizie wypadków drogowych często spotyka się niepewności wyników pomiarów będące efektem na przykład nie dość starannego ustalenia początku i końca śladu hamowania (na zdjęciach nierzadko widać, że ślad zaczyna się w innym miejscu, aniżeli przyjęto podczas oględzin). W wielu przypadkach jest tak, że ślad przebiegający łukiem mierzy się wzdłuż krawędzi jezdni, w oczywisty sposób podając zafałszowany wynik. Niedokładne są wyniki pomiarów wózkami do pomiarów liniowych z powodu nieprecyzyjnego jego ustawiania – pomimo dość dużej dokładności wózka, rzeczywista dokładność wyniku pomiaru zwykle jest znacznie mniejsza. Wyniki pomiarów pośrednich bywają niedokładne z uwagi na uproszczone modelowanie zjawiska (choćby pominięcie niektórych, „mało znaczących” składników). Często nieprawidłowo przyjmowane są wartości do obliczeń – na przykład określony w warunkach laboratoryjnych czas reakcji osoby na włączenie czerwonego światła niesłusznie jest przyjmowany jako obowiązujący w warunkach rzeczywistych i w różnych sytuacjach drogowych (o różnym stopniu komplikacji). Jak widać sporą część z tych przyczyn można zaklasyfikować do błędów grubych, niemniej szereg to także błędy systematyczne lub przypadkowe.

Podstawowe metody określania niepewności

Metody określania niepewności standardowej pomiarów bezpośrednich

Miarą niepewności pomiarowej jest niepewność standardowa, która może być oszacowana na dwa sposoby. W pierwszym sposobie wykorzystuje się analizę statystyczną serii pomiarów. Jest to tzw. niepewność typu A. Wykonując serię pomiarów n wielkości fizycznej oznaczonej jako X , otrzymamy wyniki $X_1, X_2, \dots, X_n$. Jeżeli otrzymane wyniki nie są takie same, przyjmuje się średnią arytmetyczną ze wszystkich wyników pomiarów, jako wartość najbardziej zbliżoną do prawdziwej (4):

$$X \approx \bar{X} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n X_i \quad (4)$$

Takie stwierdzenie jest tym słuszniejsze, im większa jest liczba wykonanych pomiarów; dla $n \rightarrow \infty$, $X \rightarrow \bar{X}$. W celu określenia niepewności standardowej w tym

przypadku korzysta się ze wzoru (5) na odchylenie standardowe średniej:

$$u(X) = \sqrt{s_X^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n(n-1)}} \quad (5)$$

W przypadku, gdy uzyskane wyniki pomiarów nie wykazują rozrzutu, czyli $X_1 = X_2 = \dots = X_n$ lub gdy jest tylko pojedynczy pomiar, niepewność standardową szacuje się sposobem typu B. Można tu wykorzystać informację o niepewności ΔX określonej przez producenta urządzenia pomiarowego. Każda z tej nieznanej niepewności jest realizacją niepewności konkretnego typu urządzenia pomiarowego, a więc jest zmienną losową w zbiorze przyrządów tego typu, w którym ma określony rozkład prawdopodobieństwa. Gdy nie jest on znany, przyjmuje się, że jest to rozkład jednostajny (równomierny), ograniczony niepewnością graniczną ΔX_g . Wówczas niepewność standardową typu B oblicza się ze wzoru (6):

$$u(X) = \frac{\Delta X_g}{\sqrt{3}} \quad (6)$$

Jeśli rozkład gęstości prawdopodobieństwa wartości niepewności ΔX jest typu gaussowskiego (rozkład normalny), wówczas niepewność standardową określa się formułą (7):

$$u(X) = \frac{\Delta X_g}{3} \quad (7)$$

Zwykle dysponuje się tylko częściową wiedzą na temat danej wielkości, często brakuje w pełni wiarygodnej informacji o rozkładzie jej zmian. Wówczas do rozważań najlepiej jest przyjąć rozkład, który można uznać za najbardziej niekorzystny z możliwych. W szczególności w przypadku znajomości jedynie wartości granicznych, niepewność jest równa wartości granicznej ΔX_g .

Dla prostych przyrządów pomiarowych np. miary zwijanej, kółka do pomiarów liniowych jako ΔX można przyjąć działkę elementarną przyrządu. Gdy pomiary dokonywane są urządzeniami cyfrowymi, niepewność maksymalna podawana jest przeważnie w specyfikacji urządzenia i jest kilka razy większa od działki elementarnej. Wartość ta najczęściej zależy od wielkości mierzonej i zakresu, w którym dokonujemy pomiaru.

W przypadku, gdy występuje zarówno rozrzut wyników, jak i niepewność wzorcowania, ponadto są one tego samego rzędu i żadne z nich nie może być pominięte, wówczas niepewność standardową – całkowitą – oblicza się ze wzoru (8):

$$u(X) = \sqrt{s_x^2 + \frac{(\Delta X)^2}{3}} \quad (8)$$

Jeżeli niepewność jest szacowana nie na podstawie powtarzalnych pomiarów, do oceny niepewności typu B wykorzystuje się wszelkie informacje, którymi mogą być:

- znajomość zjawisk występujących w pomiarach;
- właściwości przyrządów i metod pomiarowych;
- informacje zawarte w dokumentacji przyrządów;
- dane z wcześniejszych pomiarów;
- doświadczenie lub intuicja prowadzącego pomiary.

W literaturze anglojęzycznej często spotyka się określenie *rule of thumb* (zasada kciuka), które wskazuje oparcie się przy przyjmowaniu jakichś danych na doświadczeniu – w przypadku niepewności typu B zasada ta ma niebagatelne znaczenie.

Maksymalna niepewność standardowa

W pomiarach bezpośrednich dla mierzonej wielkości fizycznej, kiedy uwzględnia się standardową niepewność typu A (u_A) i typu B (u_B), złożona niepewność standardowa u_C określana jest jako pierwiastek z sumy kwadratów tych niepewności (tzw. średnia geometryczna) (9):

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (9)$$

Niepewność standardowa całkowicie i jednoznacznie określa wartość wyniku, jednak co do wnioskowania o zgodności wyników pomiarów wielkości fizycznych z wartościami np. tabelarycznymi, Międzynarodowa Norma wprowadza pojęcie niepewności rozszerzonej. W przypadku gdy dotyczy ona pomiarów bezpośrednich, oznaczona jest jako U . Wartość tego typu niepewności oblicza się ze wzoru (10):

$$U(X) = k \cdot u_C(X) \quad (10)$$

gdzie:

k – współczynnik rozszerzenia.

Współczynnik rozszerzenia jest liczbą przyjętą umownie, która zawiera się w przedziale $X \pm U(X)$ większości wyników pomiaru. Wartość współczynnika rozszerzenia najczęściej mieści się w przedziale 2–3, ale zaleca się przyjmowanie umownej wartości $k = 2$.

W pomiarach pośrednich wielkość poszukiwana y nie jest mierzona bezpośrednio, lecz wyznaczana na podstawie pomiarów wielkości x_i związanych z nią zależnością funkcyjną (11):

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (11)$$

Wielkości $x_1, x_2, \dots, x_n$ nazywane są wielkościami wejściowymi, natomiast y wielkością wyjściową.

Aby wyznaczyć zmianę Δy funkcji $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ spowodowaną zmianą wartości jej argumentów o $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$, należy obliczyć jej różnice w punktach $x_i + \Delta x_i$ oraz x_i dla wszystkich wartości indeksu $i = 1, 2, \dots, n$ (12):

$$\Delta y = f(x_1 + \Delta x_1, x_2 + \Delta x_2, \dots, x_n + \Delta x_n) - f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (12)$$

Rozwijając pierwszy czynnik tego wyrażenia w szereg Taylora oraz zachowując wyrażenie pierwszego rzędu, otrzymuje się wyrażenie, które odwzorowuje równanie pomiaru w zakresie niepewności i często nazywane jest równaniem niepewności pomiaru (13):

$$\Delta y = \frac{\partial f}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} \Delta x_2 + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_n} \Delta x_n \quad (13)$$

Pochodne cząstkowe (14):

$$\frac{\partial f}{\partial x_i} = c_i, \text{ gdzie } i = 1, 2, \dots, n \quad (14)$$

nazywane są współczynnikami wrażliwości, a całe wyrażenie nazywane jest różniczką zupełną. Różniczka zupełna może być stosowana do obliczeń poprawki niepewności systematycznej wielkości wyjściowej, na podstawie znanych wartości i znaku poprawek niepewności wielkości wejściowych. Często jest także określana jako niepewność maksymalna i wówczas wyraża się wzorem (15):

$$\Delta y = \left| \frac{\partial f}{\partial x_1} \Delta x_1 \right| + \left| \frac{\partial f}{\partial x_2} \Delta x_2 \right| + \dots + \left| \frac{\partial f}{\partial x_n} \Delta x_n \right| \quad (15)$$

Niepewność średnia kwadratowa

Niepewność średnią kwadratową Δy pomiaru oblicza się, korzystając z reguły kwadratowego przenoszenia niepewności (16):

$$\Delta y = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1} \Delta x_1\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2} \Delta x_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_k} \Delta x_k\right)^2} \quad (16)$$

Oszacowanie niepewności średniej kwadratowej w porównaniu z określeniem maksymalnej niepewności za pomocą różniczki zupełnej daje bardziej zawężony zakres prawdopodobieństwa. Wynika to z założenia, że prawdopodobieństwo wystąpienia wartości nominalnej wielkości fizycznej w pobliżu wartości skrajnych jest mniejsze niż w jej otoczeniu. Natomiast szacowanie niepewności maksymalnej uwzględnia cały zakres możliwych wyników.

Niedokładność niepewności

Próbując ocenić oszacowaną niepewność, można wnioskować, że każda metoda jej obliczenia jest niedokładna. Nie ma metody dokładnej, która mogłaby stać się odniesieniem do oceny niedokładności innych metod obliczenia niepewności. Możliwe jest tylko porównanie niedokładności poszczególnych metod. Jeżeli oceny niedokładności dwóch metod wyznaczania niepewności pomiaru dają oceny różniące się o mniej niż 10%, to metody te można uznać za jednakowo wiarygodne. W takim przypadku można zastosować metodę obliczeniowo prostszą, łatwiejszą do zrozumienia i stosowania, która nie będzie wymagała zbyt dużego przygotowania matematycznego.

Prezentacja wyników pomiarów i obliczeń

Liczby dokładne i przybliżone

Z punktu widzenia zagadnienia pomiaru, liczby można podzielić na dwa rodzaje:

- liczby dokładne – np. współczynniki liczbowe, wykładniki potęg;
- liczby przybliżone – wyniki pomiarów (w tym wartości pomiarów, niepewności pomiarów), dane tablicowe większości stałych matematycznych i fizycznych.

Cyfry znaczące

Cyfry znaczące danej liczby to wszystkie jej cyfry łącznie z zerami z wyjątkiem tzw. zer poprzedzających (*leading zero*). Poniżej podano kilka przykładów liczby cyfr znaczących:

- 9,81 – 3 cyfry znaczące;
- 10 – 2 cyfry znaczące;
- $1,34 \cdot 10^5$ – 3 cyfry znaczące;
- 0,045 – 2 cyfry znaczące;
- 0,0450 – 3 cyfry znaczące.

Na tej podstawie można wnioskować, że cyfry znaczące nie są tożsame z pozycjami dziesiętnymi liczby. Zaokrąglenie liczby przybliżonej polega na zmniejszeniu liczby jej cyfr znaczących.

Zasada zaokrąglania wyników pomiarów

Obliczenia wartości wielkości fizycznych bardzo często dają wyniki kilkucyfrowe, w których co najmniej dwie pierwsze cyfry są znaczące. W takim wypadku powinno się stosować regułę zaokrąglania wyników: wyniki pomiarów podaje się z dokładnością do miejsca, na którym występuje ostatnia cyfra znacząca niepewności pomiaru.

Przy wyznaczaniu wartości liczbowej niepewności pomiarowej oraz jej cyfr znaczących należy posługiwać się następującymi zasadami:

- wartość niepewności zawsze zaokrągla się w górę;
- wstępnie niepewność zaokrągla się do jednej cyfry znaczącej;
- jeżeli wstępne zaokrąglenie wartości niepewności powoduje wzrost jej wartości o więcej niż 10%, to niepewność zaokrągla się z dokładnością do dwóch cyfr znaczących.

Obliczając wartość średnią pomiaru odległości np. 15,2521 m przy odchyleniu standardowym wynoszącym $s_x = 0,1345$ m, stosując pierwszą zasadę zaokrąglania w górę do jednej cyfry znaczącej, otrzyma się $s_x = 0,2$ m. Zatem względna zmiana wartości będzie wynosiła (17):

$$\frac{(0,2 - 0,1345)}{0,1345} = 48\% \quad (17)$$

Uzyskany wynik informuje, że należy niepewność standardową zaokrąglić do dwóch cyfr znaczących, tj. $s_x = 0,14$ m. Tym razem względna zmiana wartości będzie równa (18):

$$\frac{(0,14 - 0,1345)}{0,1345} = 4\% \quad (18)$$

Taki wynik oznacza, że poprawną postacią odchylenia standardowego jest $s_x = 0,14$ m z dwiema cyframi znaczącymi. To pozwala zapisać średnią z pomiarów za pomocą cyfr znaczących (19):

$$\bar{x} = (15,25 \pm 0,14) \text{ m} \quad (19)$$

W ten sposób z początkowej wartości $\bar{x}$ pozostają jedynie cztery cyfry, przy czym po przecinku dwie cyfry znaczące.

Powyższe zasady mają szczególne znaczenie w analizie zdarzeń drogowych, jeśli wziąć pod uwagę jak często spotka się w opiniach całkowicie błędną prezentację wyników obliczeń. Autor opinii, podając np. wartość obliczonej prędkości pojazdu z dokładnością do drugiego miejsca po przecinku, zapewne nie ma świadomości, że sugeruje odbiorcy, iż tak dokładnie jest w stanie określić tę wielkość. Tymczasem odbiorca powieła z reguły ten błąd, powołując się na obliczenia biegłego, i przytacza równie precyzyjne dane. Oczywiście jest, że taka precyzja to fikcja – jeśli zgodnie z „zasadą kciuka” uznamy, że wynik określenia prędkości obarczony jest niepewnością względną rzędu 10% (co w gruncie rzeczy jest dobrym rezultatem – patrz przykłady w załącznikach), pozwala to podawać wynik w najlepszym razie w liczbach całkowitych, z pominięciem części ułamkowej.

Przykłady zastosowania rachunku niepewności w analizie wypadku drogowego

Obliczenie prędkości pojazdu na podstawie długości śladów

Jak wskazano we wstępie, ekspert analizujący przebieg wypadku drogowego z reguły otrzymuje akta sprawy, w których znajduje się przede wszystkim dokumentacja oględzin, zawierająca między innymi wyniki bezpośrednich pomiarów dokonywanych przez funkcjonariusza techniki kryminalistycznej na miejscu wypadku. Pomiaru te ograniczają się przeważnie do podawania odległości określonych charakterystycznych punktów od przyjętych obiektów (punktów, linii) odniesienia i ewentualnie rozmiarów śladów (długość, szerokość, wysokość nad podłożem). W trakcie analizy przebiegu zdarzenia istotne staje się w szczególności ustalenie prędkości pojazdu na podstawie długości pozostawionych przezeń śladów – przykładowo hamowania. Powszechnie realizowane jest to w oparciu o następującą formułę (20):

$$v = \frac{a_h}{2} \cdot t_n + \sqrt{2 \cdot a_h \cdot s} \quad (20)$$

gdzie przykładowo: $a_h = 7,0 \text{ m/s}^2$ jest przyjętą przez eksperta wartością średniego opóźnienia² w trakcie hamowania, $t_n = 0,25 \text{ s}$ czasem narastania sił hamujących na kołach samochodu, a $s = 9,3 \text{ m}$ długością śladów hamowania wynikającą z treści protokołu oględzin. Zakładając dla uproszczenia, że wartość t_n jest dokładna, powyższa formuła staje się funkcją dwóch zmiennych: a_h oraz s . Wartość niepewności pomiaru pośredniego prędkości można ustalić, stosując metodę różniczki zupełnej (21):

$$\Delta v = \left| \frac{\partial v(a_h, s)}{\partial a_h} \cdot \Delta a_h \right| + \left| \frac{\partial v(a_h, s)}{\partial s} \cdot \Delta s \right| \quad (21)$$

gdzie pochodne cząstkowe mają postać (22), (23):

$$\frac{\partial v(a_h, s)}{\partial a_h} = \frac{t_n}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{2 \cdot s}{a_h}} \quad (22)$$

$$\frac{\partial v(a_h, s)}{\partial s} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{2 \cdot a_h}{s}} \quad (23)$$

Wartości tych pochodnych określają wrażliwość wyniku na niepewność poszczególnych parametrów wejściowych. Po podstawieniu danych wynoszą one odpowiednio: 0,70 i 0,61. Jak widać, wrażliwość wyniku na niepewność opóźnienia jest nieznacznie większa niż na niepewność drogi. Wskazuje to konieczność dokładniejszego ustalania opóźnienia. Należy zwrócić uwagę, że wrażliwość nie jest parametrem stałym, ale uzależnionym od wartości parametrów wejściowych, a zatem w zależności od nich może się zmieniać.

Kolejnym krokiem jest ustalenie wartości estymaty oraz niepewności średniego opóźnienia, oraz długości śladów. To zależy od konkretnego przypadku i wiedzy eksperta. Na przykład dla suchej, bitumicznej, dobrej jakości nawierzchni jezdni i pełnego hamowania pojazdu można przyjąć średnie opóźnienie intensywnego hamowania na poziomie $a_h = (7 \pm 0,5) \text{ m/s}^2$. Długość śladów hamowania zmierzono kółkiem, co pozwala na przyjęcie niepewności wynoszącej $\pm 0,1 \text{ m}$. W wyniku obliczeń uzyskuje się estymatę prędkości $12,3 \text{ m/s}$ i niepewność pomiaru prędkości wynoszącą $0,5 \text{ m/s}$, czyli obliczona prędkość pojazdu wyniosła $v = (12,3 \pm 0,5) \text{ m/s}$. Niepewność względną wyniku to (24):

$$\frac{\Delta v}{v} \cdot 100\% = 4,1\% \quad (24)$$

W załączniku nr 1 zamieszczono arkusz obliczeniowy dla innego przypadku, opracowany z użyciem programu Mathcad, gdzie opisaną zasadę zastosowano do zagadnienia ruchu płaskiego pojazdu z obrotem. Wykorzystano w tym celu znany powszechnie model Marquarda – uproszczenie samochodu do postaci dwóch kół – wykorzystujący współczynniki rozdziału energii ruchu postępowego i obrotowego. Zagadnienie jest znacznie bardziej rozbudowane ze względu na złożone obliczenia, niemniej zasada jest dokładnie ta sama. Zastosowanie programów matematycznych lub arkuszy obliczeniowych jest o tyle cenne, że raz stworzony szablon obliczeniowy można wykorzystywać wielokrotnie, w razie potrzeby modyfikując jedynie dane wejściowe lub algorytm obliczeń. Ponadto niektóre z programów – np. wspomniany Mathcad – umożliwiają numeryczne obliczanie m.in. pochodnych funkcji bez konieczności wcześniejszego ustalania ich analitycznych postaci. Zwalnia to ze żmudnej pracy przy bardziej skomplikowanych postaciach funkcji.

W powyższych przykładach zwraca uwagę fakt, że niepewności poszczególnych parametrów przyjmowano nie adekwatnie do dokładności (klasy) przyrządów pomiarowych, tylko znacznie większe. Wzięto bowiem pod uwagę przewidywane niedokładności pomiarów, wynikające z często spotykanych błędów popełnianych podczas pomiarów (dotyczy wózka do pomiarów liniowych – wspomniano o tym wcześniej). Jeśli chodzi o niepewność wartości opóźnienia, założono ją z góry na dość dużym poziomie, ponieważ pomiarów nie dokonuje się zwykle na miejscu zdarzenia, ale przyjmuje się wartości na podstawie literatury. Uznano więc, że właściwe jest uwzględnienie szerszego zakresu zmienności tego parametru (przyjęto większą niepewność). Takie postępowanie w przypadku niepewności typu B jest dopuszczalne, a nawet wskazane.

Obliczanie energii deformacji na podstawie pomiarów odkształcenia nadwozia samochodów

Kolejnym przykładem analizy niepewności jest ustalenie dokładności oszacowania prędkości równoważnej (EES) na podstawie pomiarów deformacji samochodu, który uderzył w przeszkodę. Oszacowanie oparto na amerykańskim algorytmie Crash3 i dwupunktowym pomiarze zasięgu deformacji. Pomiar polega na ustaleniu szerokości części nadwozia kontaktującej się z przeszkodą oraz w dwóch skrajnych punktach zasięgu trwałego uszkodzenia. Następnie oblicza się pracę deformacji w oparciu o formułę (25):

$$E = L \cdot \left[\frac{A}{2} \cdot (C1 + C2) + \frac{B}{6} \cdot (C1^2 + C1 \cdot C2 + C2^2) + \frac{A^2}{2 \cdot B} \right] \quad (25)$$

W powyższej formule można wskazać na pięć zmiennych: szerokość deformacji L , zasięgi deformacji $C1$ i $C2$ oraz współczynniki A i B . Całkowitą niepewność wyniku najprościej jest określić na podstawie różniczki zupełnej, czyli sumy pochodnych cząstkowych funkcji E po poszczególnych zmiennych, przemnożonych przez niepewności tych zmiennych. Całą procedurę obliczenia energii (i dalej prędkości równoważnej pojazdu) oraz analizę niepewności przedstawiono w załączniku nr 2. Tak jak poprzednio posłużono się programem Mathcad.

Wielokrotne przeprowadzanie obliczeń (dzięki ich zautomatyzowaniu) umożliwiło obserwację zmian niepewności końcowego wyniku i wpływu niepewności poszczególnych zmiennych. Stwierdzono, że w zakresie przeciętnych uszkodzeń samochodu – a więc przy stosunkowo niewielkim wpływie odkształceń sprężystych – najistotniejszą rolę odgrywa prawidłowe ustalenie zasięgu deformacji $C1$ i $C2$ oraz współczynnika sztywności nadwozia B . Stosunkowo łatwo wyjaśnić, dlaczego tak się dzieje. Otóż przedstawiona formuła (25) jest następstwem zasady przyjętej przez autorów algorytmu, mianowicie liniowej zależności pomiędzy siłą F działającą na jednostkę powierzchni samochodu a zasięgiem odkształceń c (26):

$$F = A + B \cdot c \quad (26)$$

przy czym współczynnik A określa siłę, przy której nie dochodzi do trwałych odkształceń, zaś B jest współczynnikiem sztywności nadwozia, uzależniającym wprost zasięg odkształceń od siły. Jeśli więc w samochodzie powstają odkształcenia trwałe, to największe znaczenie dla ustalenia siły ma współczynnik sztywności i zasięg odkształcenia. Zatem niepewności tych dwóch wielkości będą miały decydujące znaczenie dla niepewności wyniku obliczenia siły. Ponieważ w najprostszym ujęciu praca jest związana z siłą poprzez wielkość przemieszczenia, jest oczywiste, że przy określonych wcześniej warunkach początkowych także na wielkość pracy największy wpływ będzie miała siła (a więc współczynnik sztywności i zasięg uszkodzeń) oraz zasięg uszkodzeń (powtórnie). W obliczeniach pokazanych w załączniku nr 2 wykazano to, obliczając nie tylko niepewność wynikową energii deformacji, ale także współczynniki wrażliwości oraz – przede wszystkim – udział ich w niepewności wynikowej.

Na podstawie przeprowadzonej w niniejszym przykładzie analizy niepewności można wnioskować, że uzyskanie „dobrego” wyniku obliczeń zależy przede wszystkim od jak najdokładniejszych pomiarów zasięgu deformacji oraz możliwie dokładnego ustalenia współczynnika sztywności nadwozia. W tym drugim przypadku oznacza to poszukiwanie wyników testów

ZAŁĄCZNIK 1

OBLICZENIE PRĘDKOŚCI SAMOCHODU W RUCHU PŁASKIM Z OBROTEM W OPARCIU O MODEL MARQUARDA Z WYKORZYSTANIEM RACHUNKU NIEPEWNOŚCI PRZY POMOCY RÓŻNICZKI ZUPEŁNEJ

Dane

$g := 9.81$	[m/s ²] przyspieszenie ziemskie
$m := 1250$	[kg] masa całkowita pojazdu
$L := 2.55$	[m] rozstaw osi
$\mu := 0.5$	współczynnik opóźnienia podczas ruchu pojazdu
$\Delta\mu := 0.1$	odchylenie wartości μ (niepewność)
$sp := 11$	[m] długość śladów bocznego poślizgu
$\Delta sp := 0.5$	[m] odchylenie wartości sh (niepewność)
$\phi := 40$	[stopnie] kąt obrotu pojazdu
$\Delta\phi := 10$	[stopnie] niepewność pomiaru ϕ

Energia pochłonięta w czasie przemieszczania pozderzeniowego z obrotem

$$\phi := \phi \cdot \frac{\pi}{180} \quad \Delta\phi := \Delta\phi \cdot \frac{\pi}{180}$$

$$k(\phi, sp) := \phi \cdot \frac{L}{2 \cdot sp}$$

$$\Delta k := \Delta\phi \cdot \frac{d}{d\phi} k(\phi, sp) + \Delta sp \cdot \frac{d}{d sp} k(\phi, sp)$$

$$k := k(\phi, sp)$$

$$ks(k) := 0.17 \cdot k^3 - 0.488 \cdot k^2 - 0.034 \cdot k + 1 \quad \text{współczynnik udziału energii}$$
$$\Delta ks := \left| \Delta k \cdot \frac{d}{d k} ks(k) \right| \quad ks := ks(k) \quad \text{przemieszczenia liniowego}$$

$$k\phi(k) := 0.328 \cdot k^3 - 0.772 \cdot k^2 + 1.072 \cdot k \quad \text{współczynnik udziału energii}$$
$$\Delta k\phi := \left| \Delta k \cdot \frac{d}{d k} k\phi(k) \right| \quad k\phi := k\phi(k) \quad \text{przemieszczenia kąowego}$$

$$Ep(\mu, sp, \phi, ks, k\phi) := m \cdot g \cdot \mu \cdot (sp \cdot ks + 0.5 \cdot L \cdot \phi \cdot k\phi) \quad \text{równanie Marquarda}$$

$$\Delta Ep1 := \left| \frac{d}{d \mu} Ep(\mu, sp, \phi, ks, k\phi) \right| \cdot \Delta\mu + \left| \frac{d}{d sp} Ep(\mu, sp, \phi, ks, k\phi) \right| \cdot \Delta sp$$

$$\Delta Ep2 := \left| \frac{d}{d \phi} Ep(\mu, sp, \phi, ks, k\phi) \right| \cdot \Delta\phi$$

$$\Delta Ep3 := \left| \frac{d}{d ks} Ep(\mu, sp, \phi, ks, k\phi) \right| \cdot \Delta ks + \left| \frac{d}{d k\phi} Ep(\mu, sp, \phi, ks, k\phi) \right| \cdot \Delta k\phi$$

$$\Delta E_p := \Delta E_{p1} + \Delta E_{p2} + \Delta E_{p3}$$

$$E_p := E_p(\mu, sp, \phi, ks, k\phi)$$

$$E_p = 6.7 \cdot 10^4 \text{ [J]} \text{ energia przemieszczenia pozderzeniowego}$$

$$\frac{\Delta E_p}{E_p} \cdot 100 = 25 \text{ [%]} \text{ względna niepewność oszacowania } E_p$$

Obliczenie prędkości początkowej pojazdu

$$v(E_p) := \sqrt{\frac{2 \cdot E_p}{m}}$$

$$\Delta v := \left| \frac{d}{dE_p} v(E_p) \right| \cdot \Delta E_p$$

$$\Delta v_2 := \frac{\Delta v}{\sqrt{3}}$$

$$v := v(E_p)$$

$$v = 10.4 \text{ [m/s]} \text{ prędkość początkowa pojazdu}$$

$$v \cdot 3.6 = 37 \text{ [km/h]}$$

$$\Delta v = 1.3 \text{ [m/s]} \text{ maks. niepewność prędkości}$$

$$\Delta v \cdot 3.6 = 5 \text{ [km/h]}$$

$$\frac{\Delta v}{v} \cdot 100 = 12.5 \text{ [%]} \text{ maksymalna niepewność względna}$$

$$\Delta v_2 = 0.7 \text{ [m/s]} \text{ średnia kwadratowa niepewność}$$

$$\Delta v_2 \cdot 3.6 = 2.7 \text{ [km/h]}$$

$$\frac{\Delta v_2}{v} \cdot 100 = 7.2 \text{ [%]} \text{ niepewność względna}$$

ZAŁĄCZNIK 2

OSZACOWANIE ENERGII DEFORMACJI

Dane

masa := 1230·kg + 75·kg całkowita masa pojazdu

$$A := 245 \cdot \frac{\text{N}}{\text{cm}}$$

$$B := 46 \cdot \frac{\text{N}}{\text{cm}^2}$$

współczynniki sztywności boku pojazdu dla kategorii "subcompact"
wg NHTSA

$$L := 150 \cdot \text{cm}$$

szerokość deformacji kontaktowych

$$C1 := 60 \cdot \text{cm}$$

zasięg deformacji

$$C2 := 40 \cdot \text{cm}$$

$$\phi := 0 \cdot \text{deg}$$

kąt działania siły deformującej względem normalnej

$$E(A, B, L, C1, C2) := L \cdot \left[\frac{A^2}{2 \cdot B} + \frac{B \cdot (C1^2 + C1 \cdot C2 + C2^2)}{6} + \frac{A \cdot (C1 + C2)}{2} \right]$$

$$Ec := E(A, B, L, C1, C2) \cdot (1 + \tan(\phi)^2)$$

$$Ec = 1.068 \cdot 10^5 \cdot \text{J} \quad \text{obliczona energia deformacji}$$

$$EES := \sqrt{2 \cdot \frac{Ec}{\text{masa}}}$$

$$EES = 46 \cdot \text{kph}$$

ekwiwalent prędkościowy energii deformacji (prędkość równoważna)

Analiza niepewności oszacowania energii deformacji

$$\Delta L := 10 \cdot \text{cm}$$

$$\Delta A := 25 \cdot \text{N} \cdot \text{cm}^{-1}$$

$$\Delta C1 := 5 \cdot \text{cm}$$

$$\Delta B := 5 \cdot \text{N} \cdot \text{cm}^{-2}$$

$$\Delta C2 := 5 \cdot \text{cm}$$

$$\Delta Ec1 := \left| \frac{d}{dL} E(A, B, L, C1, C2) \right| \cdot \Delta L + \left| \frac{d}{dC1} E(A, B, L, C1, C2) \right| \cdot \Delta C1 + \left| \frac{d}{dC2} E(A, B, L, C1, C2) \right| \cdot \Delta C2$$

$$\Delta Ec2 := \left| \frac{d}{dA} E(A, B, L, C1, C2) \right| \cdot \Delta A + \left| \frac{dB}{dB} E(A, B, L, C1, C2) \right| \cdot \Delta B$$

$$\Delta Ec := \Delta Ec1 + \Delta Ec2$$

$$\Delta Ec = 3.767 \cdot 10^4 \cdot \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$$

$$\frac{\Delta Ec}{Ec} = 35.3 \cdot \%$$

Obliczenie niepewności wyniku oszacowania prędkości:

$$\Delta EES := \frac{d}{d E_c} \left(\sqrt{2 \cdot \frac{E_c}{\text{masa}}} \right) \cdot \Delta E_c$$

$$\Delta EES = 8 \cdot \text{kph}$$

$$\frac{\Delta EES}{EES} = 17.6 \cdot \%$$

Współczynniki wrażliwości i udziały:

$$WsA := \left| \frac{d}{d A} E(A, B, L, C1, C2) \right|$$

$$\frac{WsA \cdot \Delta A}{\Delta E_c} = 5.5 \cdot \% \text{ udział niepewności współczynnika A w niepewności całkowitej}$$

$$WsB := \left| \frac{d}{d B} E(A, B, L, C1, C2) \right|$$

$$\frac{WsB \cdot \Delta B}{\Delta E_c} = 24.9 \cdot \% \text{ udział niepewności współczynnika B w niepewności całkowitej}$$

$$WsL := \left| \frac{d}{d L} E(A, B, L, C1, C2) \right|$$

$$\frac{WsL \cdot \Delta L}{\Delta E_c} = 18.9 \cdot \% \text{ udział niepewności szerokości deformacji w niepewności całkowitej}$$

$$WsC1 := \left| \frac{d}{d C1} E(A, B, L, C1, C2) \right|$$

$$\frac{WsC1 \cdot \Delta C1}{\Delta E_c} = 26.9 \cdot \% \text{ udział niepewności zasięgu deformacji C1 w niepewności całkowitej}$$

$$WsC2 := \left| \frac{d}{d C2} E(A, B, L, C1, C2) \right|$$

$$\frac{WsC2 \cdot \Delta C2}{\Delta E_c} = 23.8 \cdot \% \text{ udział niepewności zasięgu deformacji C2 w niepewności całkowitej}$$

zderzeniowych dla danego pojazdu i obliczanie na ich podstawie sztywności nadwozia. Trzeba pamiętać – o czym niejednokrotnie wspomina piśmiennictwo – że nie jest dobrym rozwiązaniem przyjmowanie uogólnionych współczynników sztywności pochodzących z publikacji z przełomu lat 70., 80., ponieważ od tego czasu bardzo zmieniły się konstrukcje pojazdów, wobec czego i sztywności nadwozi współczesnych samochodów są z reguły znacznie większe. Ponadto ryzykowne jest stosowanie współczynników uśrednionych, ponieważ w danej kategorii gabarytowej pojazdów mogą być istotne różnice sztywności pomiędzy poszczególnymi modelami.

Brak wiedzy o wartości estymaty

Wartości skrajne

W rekonstrukcji wypadku drogowego podczas przeprowadzanej analizy czasowo-ruchowej, np. przy szacowaniu prędkości pojazdu bezpośrednio przed rozpoczęciem znaczenia śladów blokowania kół na jezdni, do wzorów często wprowadzane są wartości, które przyjmuje się na podstawie zestawień tabelarycznych z literatury. Najprostszym przykładem może być współczynnik przyczepności poślizgowej, którego wartości dla suchej bitumicznej nawierzchni według tabel wynoszą 0,6–0,9. Materiał dowodowy dostarcza opisu warunków drogowych, tj. przykładowo „nawierzchnia jezdni bitumiczna, czysta, gładka”, ale nie ma wyników pomiaru współczynnika przyczepności. Zatem, opierając się na dostępnej dokumentacji tak warunków drogowych, jak i pojazdu, szeroki pierwotnie zakres można nieco zawęzić, nie ma jednak możliwości precyzyjnego określenia współczynnika przyczepności. Dlatego też w takim przypadku powinno się przeprowadzić obliczenia dla wartości granicznych z danego przedziału. W ten sposób uzyska się przedział wartości prędkości początkowych pojazdu. Należy jednak pamiętać, że w dalszej części analizy, np. podczas określania długości drogi zatrzymania pojazdu z tej prędkości, do wzoru trzeba podstawić taką samą wartość współczynnika przyczepności, jaka była przyjęta do wyznaczenia tej prędkości. Kardynalnym błędem byłoby podstawienie do wzoru maksymalnej wartości współczynnika przyczepności dla minimalnej szacowanej prędkości i w ten sposób wyznaczenie długości drogi zatrzymania samochodu.

Kolejnym przykładem operowania wartościami skrajnymi jest przyjmowanie prędkości ruchu osoby pieszej. W literaturze dostępne są wyniki różnych badań, których analiza prowadzi³ do ustalenia pewnego zakresu prędkości, z jakimi może poruszać się osoba piesza. Poniżej przedstawiony będzie szczególny przy-

kład, w którym niepewność prędkości pieszego ma decydujący wpływ na końcową opinię.

Zdarzenie polegało na potrąceniu przez samochód osoby pieszej, 15-letniego chłopca. Podczas oględzin miejsca wypadku drogowego na jezdni zostały ujawnione ślady blokowania kół pojazdu, samochód zatrzymał się na końcu tych śladów. Ponadto dokładnie znane było miejsce, w którym doszło do kontaktu pojazdu z pieszym: w miejscu tym na jezdni znajdował się ślad otarcia jej nawierzchni, który zakwalifikowano jako pochodzący od obuwia pieszego. Dla uproszczenia – wyłącznie na potrzeby niniejszego artykułu – założono, że oszacowana prędkość pojazdu w chwili kontaktu z pieszym oraz na początku śladów blokowania kół jest ustalona dokładnie, podobnie jak zmierzone odległości i przyjmowane wartości opóźnienia hamowania ($a_h = 7 \text{ m/s}^2$). Wiadomo także, że pieszy poruszał się z lewej strony jezdni na prawą z punktu widzenia kierującego pojazdem, prostopadłe do osi jezdni.

Na rycinie pokazano miejsce zdarzenia wraz z usytuowaniem pieszego w chwili kontaktu z pojazdem oraz tory ruchu pieszego i pojazdu bezpośrednio przed zdarzeniem.

Mając informację o drodze hamowania pojazdu $s_h = 14 \text{ m}$, można określić prędkość początkową samochodu (27):

$$V_1 = \frac{a_h}{2} t_n + \sqrt{2 \cdot a_h \cdot s_h} = 14,9 \text{ m/s } (54 \text{ km/h}) \quad (27)$$

Dysponując informacją o miejscu potrącenia pieszego, a zatem długością drogi hamowania po potrąceniu $s_1 = 3 \text{ m}$ (uwzględniono przedni zwis 1 m), można obliczyć prędkość pojazdu w chwili kontaktu z pieszym (28):

$$V_k = \sqrt{2 \cdot a_h \cdot s_1} = 6,5 \text{ m/s } (23 \text{ km/h}) \quad (28)$$

Czas znaczenia śladów hamowania przed potrąceniem wynosił (29):

$$t_{h1} = \frac{V_1 - V_k}{a_h} = 1,2 \text{ s} \quad (29)$$

a po uwzględnieniu czasu narastania sił hamujących $t_{h1} = 1,4 \text{ s}$.

Z informacji podanych zarówno przez samego potrąconego, jak również przez świadków zdarzenia wyini-

kało, że pieszy poruszał się krokiem normalnym, nie przyspieszał ani nie zatrzymywał się. Na podstawie rekonstrukcji toru jego ruchu stwierdzono, że od miejsca wkroczenia na jezdnię do miejsca potrącenia przeszedł drogę $s_3 = 4,8$ m. W zestawieniach różnych wyników badań⁴ prędkości ruchu osób pieszych podane zostały wartości odpowiednie dla poruszającego się normalnym krokiem 15-letniego chłopca zawierające się w granicach $V_p = 1,2 \div 1,7$ m/s. Pokonanie odległości od lewego krawężnika do miejsca potrącenia zajęłoby więc pieszemu (30):

$$t_p = \frac{s_3}{V_p} = \frac{4,8}{(1,2 \div 1,7)} = 2,8 \div 4,0 \text{ s} \quad (30)$$

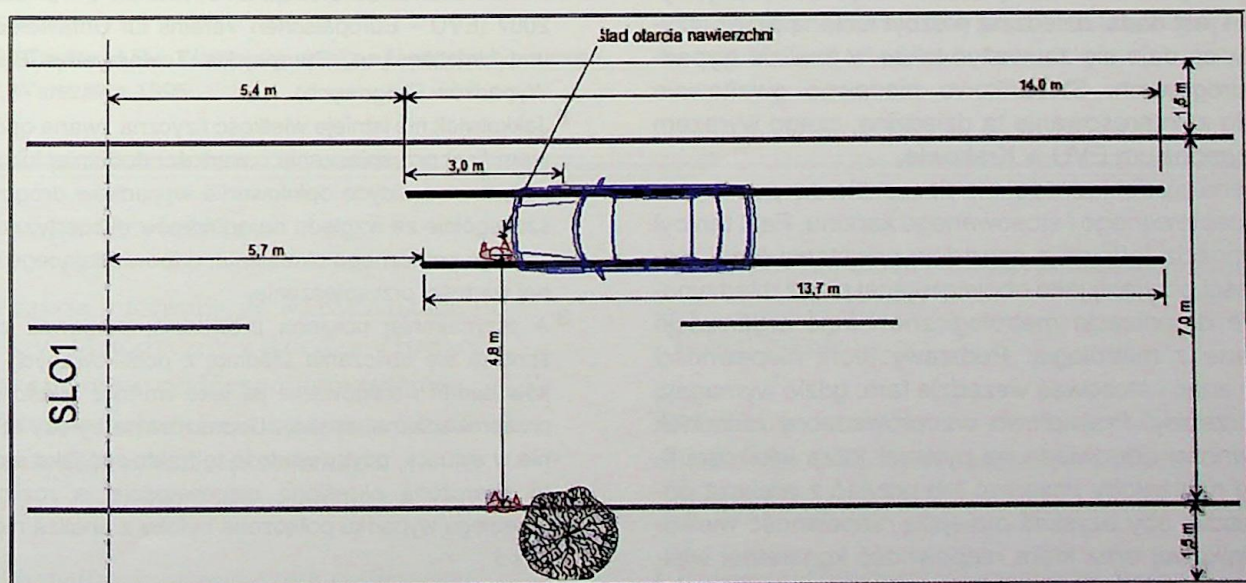
Porównanie powyższego z czasem potrzebnym na wyhamowanie samochodu do miejsca potrącenia pozwala określić, ile czasu upłynęło od chwili zaistnienia zagrożenia do chwili rozpoczęcia manewrów obronnych przez kierującego samochodem. Okazuje się, że w przypadku dolnej granicy zakresu prędkości ruchu pieszego będzie to 2,6 s, podczas gdy w przypadku górnej granicy – 1,4 s. O ile w drugim przypadku ustalony czas jest porównywalny z oczekiwanym czasem reakcji⁵ na opisaną sytuację drogową, o tyle czas 2,6 s oznacza ponadjednostekowe opóźnienie reakcji. Zatem w tej pierwszej sytuacji kierującemu samochodem można zarzucić nieuważną obserwację drogi

i/lub przedłużoną reakcją na zagrożenie, co stanowi o jego przyczynieniu się do zaistnienia wypadku, natomiast w drugim przypadku nie ma żadnych podstaw do uznania takiego przyczynienia się.

Jak wspomniano wcześniej, powyższy przykład na potrzeby tej pracy został znacznie uproszczony, wykazano jednak, że mogą pojawić się sytuacje, gdy w ramach niepewności niemożliwe staje się opiniowanie kategoryczne. Jedynym wyjściem w tej sytuacji, o ile niepewności nie da się w oparciu o materiał dowodowy zmniejszyć, jest opinia wariantowa. Jakkolwiek jest ona „niewygodna” dla organu procesowego, to opiniującemu nie pozostaje nic innego, ponieważ nie ma on uprawnień do swobodnej oceny dowodów i przyjmowania takich wartości, które zapewniłyby jednoznaczną konkluzję.

Metoda Monte Carlo

W analizie niepewności obliczeń dotyczących wypadków drogowych można zastosować metodę Monte Carlo i od pewnego czasu zauważalne jest zainteresowanie tą metodą. Przykładem jest choćby wprowadzenie jej do obliczeń optymalizacyjnych w programie PC-Crash. Jest to metoda prób stochastycznych, która umożliwia rozwiązanie złożonych problemów poprzez wielokrotne badanie wartości dobieranych losowo. W tej metodzie nie trzeba poszukiwać wyników metodami analitycznymi, wystarczy zaprojektować i skonstruować proces losowy przedstawiający różne wartości wielkości fizycznych. Przeprowadzając dużą ilość prób oraz analizując uzyskane wyniki, można osiągnąć



Ryc. Plan miejsca zdarzenia – usytuowanie pieszego w chwili kontaktu z pojazdem oraz tory ruchu pieszego i pojazdu, którymi się poruszali bezpośrednio przed zdarzeniem

Fig. Crime scene plan: Impact positions of pedestrian and vehicle, and pre-impact trajectories of accident participants

źródło: autorzy

wartości zbliżone do wartości zadanych, jeżeli poszukiwany jest wektor zmiennych wejściowych, dla których badane wartości przyjmują wartości optymalne. Ze wzrostem ilości przeprowadzonych prób wzrasta prawdopodobieństwo wylosowania takiej wartości, która da wynik niewiele różniący się od rzeczywistego ekstremum. Uproszczenie procesu obliczeniowego pozwala na akceptację wyników obarczonych nieznaczną niepewnością.

Niepewność metody Monte Carlo ε można wyrazić jako różnicę pomiędzy faktyczną wartością zaobserwowaną a wartością wykazaną przez symulację. Niepewność ta ma rząd równy (31):

$$\varepsilon \sim \frac{1}{\sqrt{n}} \quad (31)$$

gdzie: n – ilość przeprowadzonych prób.

Z tego zapisu wynika, że dla zwiększenia dokładności wyniku o jeden rząd wielkości należy stukrotnie zwiększyć ilość prób. Biorąc jednak pod uwagę możliwości obliczeniowe dzisiejszych komputerów, przeprowadzenie bardzo dużej ilości prób nie stanowi problemu, a otrzymane wyniki obciążone będą akceptowalną wielkością niepewności.

Podsumowanie

Zagadnienia teoretyczne i praktyczne oceny niedokładności pomiaru należą do teorii błędów. Niestety, była ona i jest nadal dziedziną niezbyt lubianą przez inżynierów, co daje się zauważyć także w analizie wypadków drogowych. Stosunkowo niedawno gwałtownie wzrosło zainteresowanie tą dziedziną, czego wyrazem było sympozjum EVU w Krakowie.

Ocena niedokładności nie doczekała się powszechnie akceptowanego i stosowanego kanonu. Fakt ten był z pewnością jednym z powodów powstania teorii niepewności przyjętej jako obowiązującej przez międzynarodowe organizacje metrologiczne i inne organizacje związane z metrologią. Podstawy teorii niepewności należy znać i stosować wszędzie tam, gdzie wymagają tego przepisy. Prawidłowo przeprowadzony rachunek niepewności odpowiada na pytania: które wielkości fizyczne należałoby zmierzyć lub przyjąć z większą dokładnością, aby uzyskać mniejszą niepewność wielkości wynikowej oraz która niepewność konkretnej wielkości fizycznej wnosi największy wkład do niepewności oszacowanej wartości końcowej.

Wynik pomiaru bez miary jego niedokładności nie ma żadnej wartości. Wie o tym każdy metrolog, ale wielu inżynierów, biegłych, niestety nie przyjmuje tego do

wiadomości. Nie przyjmują tego do wiadomości również zleceniodawcy biegłych, oczekując precyzyjnych odpowiedzi dotyczących parametrów ruchu uczestników wypadku. Na fali wzrostu zainteresowania oceną niepewności w analizie wypadków drogowych należałoby zadbać o upowszechnienie świadomości, że dokonywane przez biegłych obliczenia mają walor oszacowań, obciążone są (często stosunkowo łatwą do określenia) niepewnością. Faktu, że może to utrudnić pracę organów procesowych, nie sposób uznać za wystarczający powód do pomijania tak istotnej kwestii. Należy zwrócić uwagę, że mogą zdarzyć się podczas analizy i takie sytuacje, że niepewność uzyskanego wyniku wyklucza możliwość wydania kategorycznej opinii albo – co gorsza – dopuszcza możliwość wystąpienia obu skrajnych jej wariantów.

Celem niniejszego artykułu było jedynie zasygnalizowanie (a może raczej przypomnienie) istnienia niepewności w analizie wypadków drogowych. Wskazano niektóre, najczęściej spotykane jej przyczyny, opisano podstawowe metody jej określania i zwrócono uwagę na możliwy wpływ na wnioski opinii. Pozostaje mieć nadzieję, że temat ten będzie zgłębiany, tym bardziej że znalazł już miejsce wśród unormowań ISO, a nie są niczym nowym mniej lub bardziej intensywne działania w kierunku akredytacji laboratoriów kryminalistycznych Policji. To będzie musiało za sobą pociągnąć także obligatoryjne stosowanie analizy niepewności.

PRZYPISY

- ¹ XVI Doroczna Konferencja EVU, Kraków 8–10 listopada 2007 (EVU – Europäischen Vereins für Unfallforschung und Unfallanalyse, Europejskie Towarzystwo Badania Wypadków Drogowych).
- ² Jakkolwiek nie istnieje wielkość fizyczna zwana opóźnieniem (jest przyspieszenie o wartości dodatniej lub ujemnej), to w praktyce opiniowania wypadków drogowych, szczególnie ze względu na odbiorców ekspertyz, używa się tego potocznego określenia, odpowiadającego ujemnej wartości przyspieszenia.
- ³ A przynajmniej powinna prowadzić, ponieważ często spotyka się obliczanie średniej z publikowanych wyników badań i traktowanie jej jako wartość właściwą do przeprowadzanej analizy. Dopuszczalne byłoby to jedynie w sytuacji, gdyby wartość tę traktować jako estymatę obciążoną określoną niepewnością, a rozliczenie przebiegu wypadku połączone byłoby z analizą niepewności.
- ⁴ Wypadki drogowe. Vademecum biegłego sądowego, IES, Kraków 2006.
- ⁵ Przyjmując za literaturę, że reakcja na prostą, aczkolwiek nieoczekiwaną sytuację zagrożenia w przypadku 85–95% kierujących mieści się w czasie 1,3–1,5 s.

BIBLIOGRAFIA

1. Dorozhovets M., Warsza Z.: Propozycje rozszerzenia metod wyznaczania niepewności wyniku pomiarów wg Przewodnika GUM – uściślenie metod obliczeń niepewności typu B, „Pomiary Automatyka i Robotyka” 2007, nr 2.
2. Dorozhovets M., Warsza Z.: Propozycje rozszerzenia metod wyznaczania niepewności wyniku pomiarów wg Przewodnika GUM – uwzględnienie wpływu autokorelacji i nieadekwatności rozkładu wyników obserwacji w niepewności typu A; „Pomiary Automatyka i Robotyka” 2007, nr 1.
3. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, ISO 1993 (rev. 1995).
4. Jaworski B.M., Dietlaf A.A.: Fizyka. Poradnik encyklopedyczny, Warszawa 2004.
5. Jaworski M.: Niepewność pomiaru, rozkłady zmienionych losowych modelujących błędy pomiarów, materiały XXXVI Międzynarodowej Konferencji Metrologów MKM'04.
6. Kilias J., Kostrzyński T., Wojciechowski S.: Podstawy fizyki dla studentów informatyki, WAT, Warszawa 2000.
7. Klonecki W.: Statystyka dla inżynierów, PWN, Warszawa 1999.
8. Kozłowski K., Zieliński R.: Metody opracowania i analizy wyników pomiarów – I laboratorium z fizyki cz. 1; Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2003.
9. Salejda W., Poprawski R.: Podstawy analizy niepewności pomiarowych w studenckim laboratorium podstaw fizyki, Politechnika Wrocławska, Wrocław 2002.
10. Szczypiński R.: Crash3 – amerykański model do szacowania energii zużytej na deformację pojazdu, „Paragraf na Drodze” 2000, nr 7, IES, Kraków 2000.
11. Szydłowski H.: Pracowania fizyczna, PWN, Warszawa 1994.
12. Taylor J.R.: Wstęp do analizy błędów pomiarowych, WNT, Warszawa 1995.

13. Turzeniecka D.: Analiza dokładności wybranych przybliżonych metod oceny niepewności, Politechnika Poznańska, Poznań 1999.

14. Wach W.: Niepewność obliczeń dotyczących zderzeń pojazdów, „Paragraf na Drodze” 2008, nr 8, IES, Kraków 2008.

15. Wyrażanie niepewności pomiaru: Przewodnik, Główny Urząd Miar, Warszawa 1999.

16. Zbiór referatów XVI Dorocznej Konferencji EVU, Kraków 8–10 listopada 2007 r.

Streszczenie

W artykule poruszono kwestię szacowania niepewności pomiarowych w badaniach wypadków drogowych, zwrócono także uwagę na wymogi stawiane laboratoriom badawczym przez organizacje standaryzacyjne (w szczególności ISO). Wskazano metody określania niepewności, ich podstawowe źródła, zasady prezentowania wyników obliczeń. Podano także kilka przykładów obliczeń różnych rodzajów zdarzeń z uwzględnieniem niepewności.

Słowa kluczowe: niepewność pomiarów, badania wypadków drogowych.

Summary

The article touches upon the question of uncertainty of measurements in traffic accidents investigation, as well as requirements of standardisation organizations (particularly ISO). Basic methods of uncertainty calculation are described, as well as the sources of uncertainty, and the rules of results presentation. Some examples of various calculations containing uncertainty estimation are demonstrated.

Keywords: uncertainty of measurements, traffic accidents investigation and calculations.

Uwaga Czytelnicy

Redakcja informuje, że wkrótce ukaże się Zeszyt Metodyczny z dziedziny badania dokumentów pod wspólnym tytułem:

Wybrane zagadnienia z zakresu badań identyfikacyjnych rękopisów.

Zeszyt obejmuje 4 opracowania:

- Wizualizacja zespołów cech graficznych analizowanych w procesie identyfikacji rękopisów
– Joanna Wilczewska

- Próba określenia cech charakterystycznych pisma osób z zespołem ADHD
– Robert Nazdrowicz

- Możliwości identyfikacji wykonawcy podpisu nakreślonego na nietypowo ułożonym podłożu
– Małgorzata Jankowska

- Badania autentyczności sygnatur na obrazach. Analiza śladu narzędzia
– Oliwia Przybysz