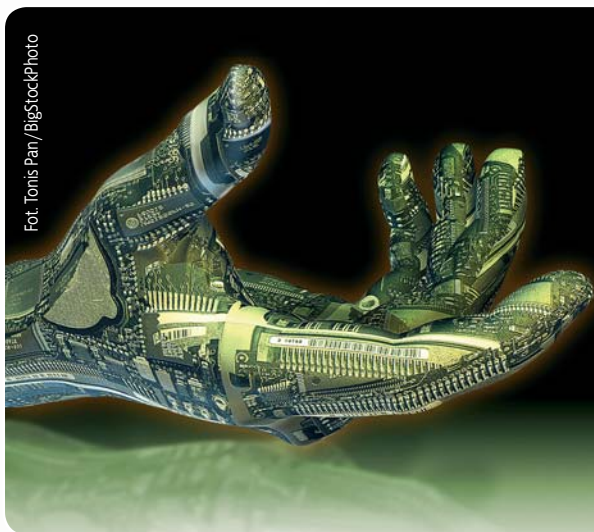


mgr inż. MARCIN MILANOWICZ
mgr inż. PAWEŁ BUDZISZEWSKI
Centralny Instytut Ochrony Pracy
– Państwowy Instytut Badawczy

Wykorzystanie symulacji komputerowej do rekonstrukcji wypadków przy pracy



Fot. Tomis Pan / BigStockPhoto

Wypadki przy pracy to zjawisko bardzo powszechne. Mogą skutkować one kalectwem, a nawet śmiercią pracownika. Często okoliczności zajścia wypadku nie są znane, np. z powodu braku naocznych świadków lub ich sprzecznych zeznań. Znajomość przebiegu i przyczyny wypadku przy pracy może być bardzo pomocna przy rozstrzygnięciu kwestii spornych, np. w procesie sądowym. Inną zaletą może być zapobieganie wystąpieniu podobnej sytuacji w przyszłości. W Centralnym Instytucie Ochrony Pracy – Państwowym Instytucie Badawczym realizowane są prace związane z wykorzystaniem symulacji komputerowej do rekonstruowania wypadków przy pracy. Dzięki temu możliwe jest ustalenie prawdopodobnej przyczyny wypadku.

The use of computer simulation in reconstructing accidents at work

Accidents at work are very common. They can result in a worker's serious injury or even death. The cause of an accident is often unknown, e.g., because of conflicting reports of eyewitnesses or because there were none. Knowing the course and cause of an accident at work may be very helpful in resolving controversies in a lawsuit. Prevention of similar situations is another advantage. CIOP-PIB studies the use of computer simulation in reconstructing accidents at work. Simulations make determining the probable cause of accidents possible.

Wstęp

Statystyki pokazują, że liczba wypadków przy pracy od lat utrzymuje się na wysokim poziomie. Według danych GUS liczba poszkodowanych w ich wyniku osób dochodzi w Polsce w niektórych latach nawet do 100 tysięcy, a na świadczenia pieniężne z funduszu wypadkowego ZUS wydano w 2009 r. blisko 4,95 mld zł [1]. Ograniczenie liczby tych zdarzeń może mieć zatem bardzo wymierne korzyści zarówno dla przedsiębiorstw, jak również w skali ogólnokrajowej.

Aby skutecznie zapobiegać wypadkom, konieczna jest m.in. znajomość ich przebiegu oraz przyczyn. Umożliwia to przede wszystkim podejmowanie środków zapobiegających powstawaniu podobnych wypadków w przyszłości poprzez doskonalenie i właściwy dobór środków technicznych, opracowanie procedur bezpieczeństwa oraz poprawę organizacji pracy i świadomości pracowników, m.in. w efekcie szkoleń. Jednym ze sposobów określania przyczyn i skutków jest, dzięki rozwojowi technologii komputerowych, modelowanie zjawisk fizycznych, umożliwiające odtworzenie rzeczywistego biegu wydarzeń. Metody symulacji komputerowej mogą być wykorzystywane zarówno w celu poprawy bezpieczeństwa i ograniczenia liczby wypadków przy pracy, jak też do pomocy przy rozstrzygnięciu kwestii spornych, np. ustalania winy w procesie sądowym.

Zazwyczaj komputerowe rekonstrukcje koncentrują się na wypadkach drogowych, głównie z uwagi na prężny rozwój motoryzacji i ciągłe dążenie do zwiększania bezpieczeństwa w ruchu drogowym. W odróżnieniu jednak od wypadków drogowych, wypadki przy pracy mają bardzo różne przyczyny – mogą być następstwami zagrożeń mechanicznych, chemicznych etc. Wykorzystując oprogramowanie do symulacji ich dynamiki i kinematyki, w CIOP-PIB skupiono się na tych wypadkach przy pracy, które są związane z zagrożeniami mechanicznymi: upadkach, przewróceniach, uderzeniach czy potrąceniach.

W artykule przedstawiono wyniki badań z zastosowaniem symulacji komputerowej w celu rekonstrukcji wypadków przy pracy, na przykładzie rzeczywistego zdarzenia.

Metodyka

Od momentu skonstruowania pierwszych komputerów trwa szybki rozwój metod numerycznych, dzięki którym można dzisiaj nie tylko rozwiązywać skomplikowane równania matematyczne, ale również wykorzystywać do symulowania różnorodnych zjawisk fizycznych, jak np. obliczenia naprężeń w konstrukcjach, badania opływu powietrza wokół samochodu czy wyznaczenia rozkładu ciśnienia w instalacjach grzewczych.

Dziś trudno sobie wyobrazić istnienie konkeru samochodowego, który nie korzystałby z tych metod do obliczania wytrzymałości konstrukcji pojazdów, badania naprężeń cieplnych silnika, a także symulowania wypadków z udziałem projektowanych we własnych biurach konstrukcyjnych samochodów. Symulowanie wypadków stało się powszechne, ponieważ eliminuje konieczność niszczenia dużej liczby samochodów, a każda kolejna zmiana konstrukcji nie wymaga produkowania kolejnego prototypu. Do symulowania wypadków przeznaczonych jest wiele programów komputerowych, takich jak: Mady-mo, LsDyna czy PamCrash.

Celem symulowania wypadku jest zbadanie jego skutków oraz ocena nie tylko zniszczeń, jakich doznał samochód, ale przede wszystkim urazów, na które narażony jest człowiek biorący w nim udział. W wyniku symulacji powstaje animacja obrazująca wypadek oraz przebiegi w czasie takich wielkości fizycznych, jak siła, moment siły, przyspieszenie, prędkość i przemieszczenie. Znajomość tych wielkości umożliwia ocenę prawdopodobieństwa wystąpienia urazów, których doznałby człowiek, gdyby wypadek zdarzył się w rzeczywistości. Najczęściej programy służące do symulowania wypadków mają własne modele człowieka, umożliwiające dokonanie oceny

urazów przy pomocy tzw. kryteriów odporności biomechanicznej. Kryteria te pozwalają na powiązanie wyznaczonych na podstawie symulacji wielkości fizycznych z prawdopodobieństwem wystąpienia urazów części ciała poddanej takim samym obciążeniom [2].

Skoro zatem symulacje komputerowe wykorzystywane są z powodzeniem do analizowania skutków wypadku przy znajomości jego przebiegu, to dlaczego nie byłoby możliwe działanie odwrotne, tzn. znalezienie przyczyny wypadku przy znajomości jego skutków? Ustalenie ciągu zdarzeń, które doprowadziły do wypadku, często nie jest łatwe. Spowodowane może to być zarówno brakiem wystarczających danych z miejsca wypadku, np. w sytuacji, gdy nie ma jest naocznych świadków zdarzenia lub gdy należy wybrać jedną z wzajemnie wykluczających się wersji zeznań. Wykorzystanie technik symulacji komputerowej staje się wówczas nieocenioną pomocą.

W ramach działalności CIOP-PIB prowadzone są prace nad wykorzystaniem symulacji komputerowej do rekonstrukcji wypadków przy pracy. Do tego celu użyty został wspomniany program Madymo. Zaletą tego oprogramowania w stosunku do innych pakietów jest fakt, że ma on bogatą bibliotekę komputerowych modeli człowieka oraz manekinów. W rekonstrukcji wykorzystano model pieszego (*Pedestrian*) [3]. Madymo wykorzystuje do obliczeń metodę układów wieloczłonowych i to właśnie z niej skorzystano podczas pracy nad rekonstrukcją opisanego wypadku. W skrócie, metoda ta polega na budowaniu symulowanych obiektów ze sztywnych ciał powiązanych ze sobą za pomocą tzw. połączeń kinematycznych. Symulowanie przemieszczeń tych ciał realizowane jest na podstawie równań ruchu. Podstawową zaletą tej metody w porównaniu z innymi wykorzystywanymi w programach tego typu (np. metodą elementów skończonych) jest znacznie krótszy czas obliczeń, dzięki czemu możliwe jest przeprowadzenie większej liczby symulacji w danym czasie.

Przykład rekonstrukcji wypadku

Schemat postępowania podczas rekonstrukcji omówiony zostanie na przykładzie rzeczywistego wypadku przy pracy. Zdarzenie to miało miejsce bez obecności naocznych świadków. Po placu, na terenie zakładu pracy poruszały się, ładujące palety na samochód wózek podnośnikowy czołowy (widłowy), kierowany przez jednego z pracowników. W godzinach południowych wszyscy pozostali pracownicy udali się na przerwę śniadaniową. Gdy przebywali w jednym z pomieszczeń, usłyszeli dochodzący z zewnątrz głośny huk. Natychmiast wybiegli i zauważyli leżący na boku wózek podnośnikowy, a pod nim poszkodowanego. Operator został przygnieciony do ziemi ramą wózka, która oparta była w okolicy jego karku. Znajdujące się nieopodal ślady opon na kostce brukowej pozwalały przypuszczać, że operator, wracając po kolejną partię towaru, wykonał manewr skrętu w prawo, zakończony

przewróceniem wózka. W wyniku tego zdarzenia pracownik poniósł śmierć na miejscu.

Wobec braku naocznych świadków wypadku kluczową kwestią stało się ustalenie przyczyn przewrócenia się wózka. Biorąc pod uwagę ślady pozostawione na kostce brukowej można było przypuszczać, że przyczyną tą była nadmierna prędkość. Należało zatem odpowiedzieć na pytanie, czy w przypadku tego wózka podnośnikowego możliwe było wykonanie manewru skrętu zakończonego przewróceniem, którego przebieg pasowałby do udokumentowanych śladów. Jeżeli tak, to wykorzystanie symulacji komputerowej daje możliwość wyznaczenia prędkości, z jaką poruszał się wózek oraz opisanie manewru, który wykonywał jego operator.

Założeniem rekonstrukcji było takie dobranie parametrów symulacji, aby tor ruchu symulowanego wózka był możliwie podobny do pozostawionych śladów, a przewrócenie nastąpiło w miejscu, gdzie leżał wózek. Na parametry symulacji składają się:

- prędkość wózka w momencie wejścia w zakręt
- zmiana kąta skręcenia kół w czasie (zmieniając zarówno maksymalną wartość kąta, jak i czas, w jakim operator kręcił kierownicą).

Dla przebiegu symulacji kluczową jest znajomość pewnych wielkości fizycznych, takich jak parametry wózka i współczynnik tarcia pomiędzy kołami a nawierzchnią. Ponieważ w dokumentacji nie umieszczono dokładnych informacji o stanie podłoża, po którym poruszał się wózek, dlatego wartość współczynnika tarcia została przyjęta jako dodatkowy parametr kontrolny.

Jest także bardzo prawdopodobne, że operator próbował ratować się w momencie przewracania się wózka podnośnikowego. Ponieważ jednak nie ma możliwości przewidzenia jego dokładnej reakcji, w symulacji zachowanie modelu operatora zależało jedynie od działających na niego sił.

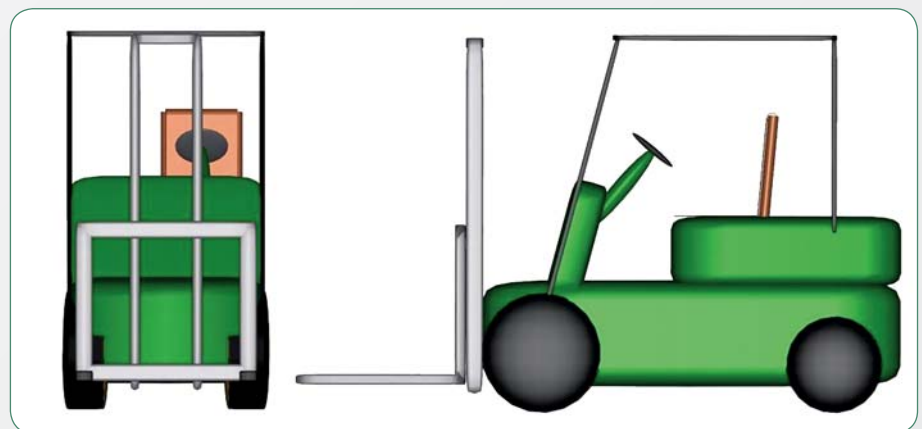
Zgodnie z dokumentacją medyczną, poszkodowany doznał licznych urazów w postaci zasinień i złamań kości czaszki, złamania kręgosłupa szyjnego z przerwaniami i przemieszczeniem oraz licznych otarć w okolicy karku. Oceny stanu głowy

dokonywane są na podstawie tzw. kryterium odporności biomechanicznej głowy (*ang. Head Injury Criterion – HIC*). Podczas symulacji rejestrowane jest przyspieszenie głowy w momencie uderzenia o podłoże. Uzyskane wartości tego przyspieszenia są wykorzystywane do wyznaczenia wartości wskaźnika HIC. W literaturze przedstawione są zależności pomiędzy wartością wskaźnika HIC a odniesionym urazem – podana jest np. wartość krytyczna współczynnika, w odniesieniu do której występuje wysokie prawdopodobieństwo, że człowiek doznał wstrząśnienia mózgu oraz pęknięcia czaszki [4]. Znając wartość tego wskaźnika można z pewnym prawdopodobieństwem wnioskować o urazach głowy. Istnieje również kilka kryteriów pomocniczych w ocenie stanu kręgosłupa szyjnego. W rozważanym przypadku „mierzone” były siły i momenty siły, jakie działały przez określony czas na tę część ciała. Znając ich wartości, analogicznie jak w przypadku głowy można z pewnym prawdopodobieństwem określić stan kręgosłupa szyjnego.

Komputerowy model miejsca zdarzenia

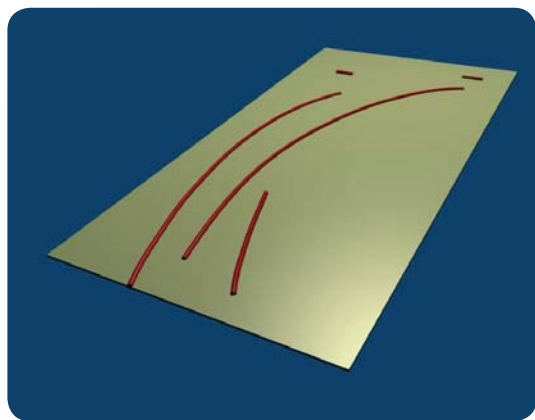
Podczas prac nad rekonstrukcją, po zebraniu i przeanalizowaniu danych z miejsca wypadku, wykonano komputerowy model wszystkich istotnych przedmiotów, które mogły brać udział w wypadku, m.in. kostki brukowej pokrywającej plac, na którym doszło do wypadku oraz wózka podnośnikowego. Tworzenie modelu każdego przedmiotu rozpoczyna się od określenia jego geometrii, następnie nadawane są jego własności fizyczne. W przypadku modelu wózka podnośnikowego jego geometrię oraz własności, takie jak masa, położenie środka ciężkości i momenty bezwładności poszczególnych elementów określono na podstawie danych technicznych. Ponadto tak przygotowany model (rys. 1.) musiał mieć własności jezdne możliwie zbliżone do jego rzeczywistego odpowiednika. W tym celu określono promień skrętu wózka, jego prędkość itp. parametry.

W odniesieniu do wypadków z udziałem pojazdów bardzo istotne z punktu widzenia rekonstrukcji są ślady, pozostawione przez opony w trakcie zdarzenia – powinny być one zatem



Rys. 1. Komputerowy model wózka podnośnikowego czołowego

Fig. 1. A computer model of a forklift



Rys. 2. Ślady wózka odtworzone w postaci modelu trójwymiarowego
Fig. 2. Traces of a forklift reconstructed in the form of a 3D model

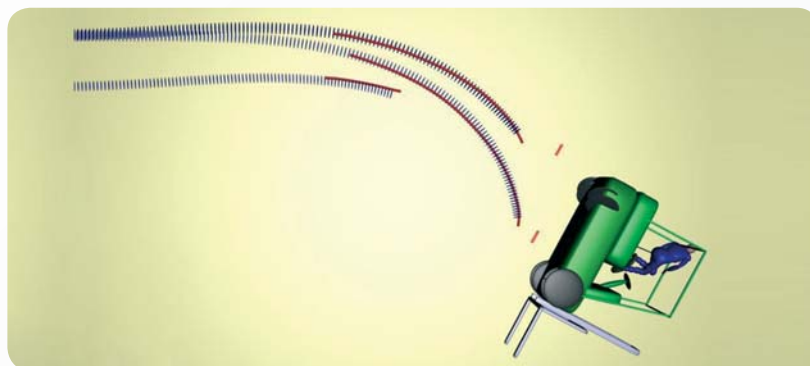
uwzględnione podczas budowy modelu miejsca wypadku. W tym przypadku na kostce brukowej widoczne były wprawdzie ślady pozostawione przez opony wózka, dostępne dane nie pozwoliły jednak na opisanie ich kształtu i umiejscowienie względem przewróconego wózka. Do dokumentacji dołączone były jedynie fotografie wykonane przez stojącą na placu osobę. Znanych jest wiele technik umożliwiających wykonanie komputerowego modelu śladów jedynie na podstawie zdjęć z miejsca zdarzenia.

W prezentowanej rekonstrukcji wykorzystano tzw. metodę siatki [5]. Polega ona na nałożeniu na fotografię siatki opartej na wzorcu dowolnego, leżącego na jezdni przedmiotu o znanych wymiarach i wykorzystaniu jej do odtworzenia śladów w rzucie prostokątnym. W tym przypadku wykorzystano widoczną na zdjęciu kostkę brukową, której wymiary są znane. Gotowy model śladów przedstawiono na rys. 2.

Po przygotowaniu wszystkich modeli przedmiotów wprowadzony został model człowieka, który odzwierciedlał zachowanie operatora wózka. Usadowiono go w fotelu kierowcy. Ostatnią fazą budowy modelu otoczenia było określenie zależności pomiędzy przedmiotami, tzn. ustalenie siły, z którą wózek powinien naciskać na powierzchnię kostki brukowej oraz zadanie siły grawitacji.

Wyniki symulacji

Podczas prac przygotowano ok. 700 symulacji. Gdy model wózka jechał z prędkością mniejszą niż 18 km/h nie udało się go przewrócić, niezależnie od sposobu skręcenia kół, natomiast przy prędkości wyższej niż 18 km/h model przewracał się w momencie wykonania gwałtownego manewru skrętu kół. Po przeanalizowaniu wyników wybrano wariant, w którym przebieg zdarzeń (a w szczególności ślad symulowanego wózka) najlepiej pasował do danych opisujących skutki wypadku oraz dokumentacji fotograficznej, wykonanej na miejscu zdarzenia. W wariacie tym model wózka jechał z prędkością 23 km/h, najpierw prosto, potem wykonał skręt kół maksymalnie w prawo (rys. 3.).



Rys. 3. Pierwszy wariant symulacji – kolorem niebieskim oznaczono ślady z symulacji, czerwonym ślady referencyjne. Krótkie czerwone linie oznaczają miejsca, gdzie w rzeczywistości kończyły się koła leżącego wózka
Fig. 3. The first variant of a simulation – blue indicates traces in a simulation, red indicates reference traces. Short red lines indicate where the wheels of the lying forklift really ended

Ślady uzyskane z symulacji dosyć dobrze pasują do śladów referencyjnych (tzn. śladów pozostawionych przez rzeczywisty wózek podnośnikowy). Miejsce, w którym leżał model wózka również dopasowane jest w stopniu bardzo zbliżonym do miejsca referencyjnego. Niewielkie różnice w ułożeniu modelu mogą być spowodowane faktem, iż w rzeczywistości kontakt pomiędzy wózkiem a podłożem może mieć bardziej skomplikowaną naturę, niż zostało to przyjęte w symulacji.

Zgodnie z opisem, bezpośrednio po wypadku operator wózka znajdował się na ziemi, a rama wózka przyciskała mu kark. W symulacji nie uwzględniono aktywnego zachowania operatora, a właśnie zachowanie osoby usiłującej uratować się w krytycznej sytuacji ma wpływ na ułożenie ciała. Mimo to wyrzucony siłą bezwładności model człowieka znajdował się w pozycji zbliżonej do tej z opisu miejsca wypadku.

Porównując wyniki symulacji z wartościami kryteriów odporności biomechanicznej głowy i kręgosłupa szyjnego można stwierdzić, że w obu przypadkach przekroczone zostały wartości krytyczne, które oznaczają pęknięcie czaszki zagrażające życiu oraz przerwanie kręgosłupa szyjnego z przemieszczeniem. Jest to zgodne z opisem sekcji zwłok, według którego operator wózka miał liczne złamania kości czaszki oraz złamanie kręgosłupa szyjnego z przemieszczeniem.

Zgodnie z wynikami symulacji, jako najbardziej prawdopodobną przyczynę przewrócenia wózka podnośnikowego wskazać można nadmierną prędkość i gwałtowny manewr wykonany przez operatora.

Podsumowanie

Jak wynika z przedstawionego przykładu, wykorzystanie metod numerycznych umożliwiło odtworzenie przebiegu wypadku przy pracy wraz z wartościami zarejestrowanych wielkości fizycznych i wskazanie prawdopodobnych jego przyczyn. Zastosowanie symulacji komputerowej może znacznie wspomóc pracę m.in. komisji powypadkowych, Państwowej Inspekcji Pracy, sądów oraz prawników reprezentujących interesy pracowników bądź pracodawców.

Wykorzystanie symulacji komputerowej ma też tę zaletę, że umożliwia odwzorowanie sytuacji wypadkowych na stanowiskach pracy. Dzięki temu łatwiejsze jest rozpoznanie potencjalnych zagrożeń w miejscu pracy, także w przypadku dopiero projektowanych stanowisk pracy. Korzystając z animacji obrazującej wypadek, można opracowywać materiały szkoleniowe, mające na celu zwiększanie świadomości pracowników na temat zagrożeń występujących na stanowiskach pracy i związanego z nimi ryzyka.

Wykorzystanie metod numerycznych do rekonstrukcji wypadków przy pracy nie jest co prawda tak powszechne, jak w przypadku wypadków drogowych, jednak widoczny jest rozwój tej techniki, głównie na Zachodzie Europy oraz w Stanach Zjednoczonych, gdzie działają prywatne firmy specjalizujące się w rekonstruowaniu wypadków przy pracy. Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy jest jednym z pierwszych ośrodków w Polsce zajmujących się tymi zagadnieniami.

PIŚMIENNICTWO

- [1] *Ważniejsze informacje z zakresu ubezpieczeń społecznych 2009 r.* Zakład Ubezpieczeń Społecznych – Departament Statystyki, maj 2010
- [2] K. Konarzewski, M. Matyjewski, C. Rzymkowski *Wybrane zagadnienia biomechaniki zderzeń*. Rozdz. 14.2. monografia *Biocybernetyka i inżynieria biomedyczna 2000* pod red. M. Nałęcza, tom 5 *Biomechanika i inżynieria rehabilitacyjna*, Polska Akademia Nauk, Akademicka Oficyna Wydawnicza „Exit”, str. 747-797, Warszawa 2004
- [3] MADYMO Human Models Manual Release 7.3, TASS 2010
- [4] J. Hutchinson, M. J. Kaiser, H. M. Lankarani *The Head Injury Criterion (HIC) functional*. “Applied Mathematics and Computation”, Vol. 96, Issue 1, October 1998, pp. 1-16
- [5] L. Prochowski, J. Unarski, W. Wach, J. Wicher *Podstawy rekonstrukcji wypadków drogowych*. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 2008

Publikacja opracowana na podstawie wyników uzyskanych w ramach I etapu programu wieloletniego pn. „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy” dofinansowanego w latach 2008-2010 w zakresie badań naukowych i prac rozwojowych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wzwyższego. Koordynator: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.