

POSTĘPY W INŻYNIERII MECHANICZNEJ
DEVELOPMENTS IN MECHANICAL ENGINEERING

3(2)/2014, 49-57

Czasopismo naukowo-techniczne – Scientific-Technical Journal

Michał STOPEL, Michał BURAK

SPOSOBY MODELOWANIA ELEMENTÓW KONSTRUKCJI
WSPORCZYCH INFRASTRUKTURY DROGOWEJ

Streszczenie: W pracy przedstawiono wybrane sposoby modelowania słupa wsporcze go znaku drogowego w programie LS-Dyna. Podjęto próbę wykazania zalet i wad dla poszczególnych rozwiązań. Podczas analizy skupiono się na sposobie modelowania słupa, upraszczając pozostałe elementy konstrukcji w tym utwierdzenie w podłożu.

Słowa kluczowe: LS-Dyna, MES, konstrukcje wsporcze, bezpieczeństwo bierne

1. WSTĘP

Zgodnie z danymi statystycznymi dotyczącymi przyczyn wypadków drogowych w Polsce, wpływ czynników drogowych, w tym infrastruktury, na bezpieczeństwo mieści się w przedziale od 2 do 4%. Europejscy eksperci uważają natomiast, że niewłaściwa infrastruktura drogowa mogła w pośredni bądź bezpośredni sposób przyczynić się do zajścia 28÷34% wypadków drogowych [1]. Wylicza się, iż koszty, jakie poniesiono w Polsce w 2010 roku w związku ze zdarzeniami drogowymi, to 742 mln złotych, z czego aż 75 mln to koszty wypadków z udziałem infrastruktury drogowej. W tabeli 1 zebrano dane dotyczące procentowego udziału infrastruktury drogowej w ogólnej liczbie wypadków drogowych w 2010 roku. Przybliżone dane w sposób jednoznaczny wskazują, jak duże znaczenie ma zapewnienie biernego bezpieczeństwa poprzez stosowanie odpowiedniej infrastruktury na drogach [2].

Tabela 1. Udział infrastruktury drogowej w ogólnej liczbie wypadków w Polsce w 2010 roku
Table 1. The share of road infrastructure in the total number of accidents in Poland, 2010

Rodzaj zdarzenia	wypadki		zabici		ranni	
	ogółem	%	ogółem	%	ogółem	%
Najechanie na słup, znak	731	1,9	75	1,9	945	1,9
Najechanie na barierę ochronną	318	0,8	40	1,0	401	0,8

Poprawa bezpieczeństwa podróżujących po drogach z roku na rok zyskuje coraz większe zainteresowanie zarówno wśród instytucji państwowych, jak i prywatnych. Powstają nowe rozwiązania i konstrukcje urządzeń składających

mgr inż. Michał STOPEL, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej, ul. prof. S. Kaliskiego 7, 85-789 Bydgoszcz, e-mail: michal.stopel@utp.edu.pl
mgr inż. Michał BURAK, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej, ul. prof. S. Kaliskiego 7, 85-789 Bydgoszcz, e-mail: michal.burak@utp.edu.pl

się na bezpośrednie otoczenie jezdni. Wraz z rosnącymi wymaganiami dotyczącymi zachowania się tych elementów zarówno w fazie normalnej eksploatacji, jak i w bezpośrednim zderzeniu z pojazdem, istnieje potrzeba przeprowadzania wielu testów zderzeniowych. Testy pozwalają na skonfrontowanie założeń konstrukcyjnych z rzeczywistością. Wiążą się jednak z wysokimi kosztami wynikającymi z jednostkowej produkcji prototypu, uszkodzeń pojazdu wykorzystanego podczas testu zderzeniowego oraz zaangażowania ekspertów w przygotowanie oraz przeprowadzenie bezpośredniego eksperymentu.

Pomocą w takiej sytuacji są systemy pozwalające na przeprowadzenie analizy zjawisk szybkozmiennych z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Powszechnie stosowanym programem do prowadzenia analiz tego typu jest program LS-Dyna. Dzięki zastosowaniu symulacji numerycznych można znacznie zredukować koszty związane z wprowadzeniem na rynek nowego rozwiązania, mającego na celu poprawę bezpieczeństwa na drogach. Przeprowadzenie testów zderzeniowych w środowisku wirtualnym pozwala na wprowadzenie poprawek w konstrukcji już na etapie projektowania – przed wyprodukowaniem prototypu. W wielu publikacjach naukowych dotyczących prowadzenia testów zderzeniowych z wykorzystaniem programu LS-Dyna dowodzi się, iż przy zastosowaniu odpowiednich nastaw zmiennych parametrów uzyskuje się bardzo wysoką zbieżność z rzeczywistością [3, 4].

1.1. Bezpieczeństwo bierne na drogach

Poprzez pojęcie bezpieczeństwa biernego rozumie się ogół czynników, których celem jest zredukowanie skutków już zaistniałego wypadku drogowego bądź kolizji. Europejska norma PN-EN 12767:2003 „Bierne bezpieczeństwo konstrukcji wsporczych dla urządzeń drogowych. Wymagania i metody badań” określa, jakie wymagania eksploatacyjne stawia się konstrukcjom biernie bezpiecznym, stanowiącym stały element wyposażenia dróg. W normie tej znajdują się również ograniczenia dotyczące dotkliwości urazów odniesionych przez osoby poszkodowane w wyniku zderzenia z konstrukcjami biernie bezpiecznymi.

Norma PE-EN 12767:2003 klasyfikuje drogowe konstrukcje w trzech kategoriach:

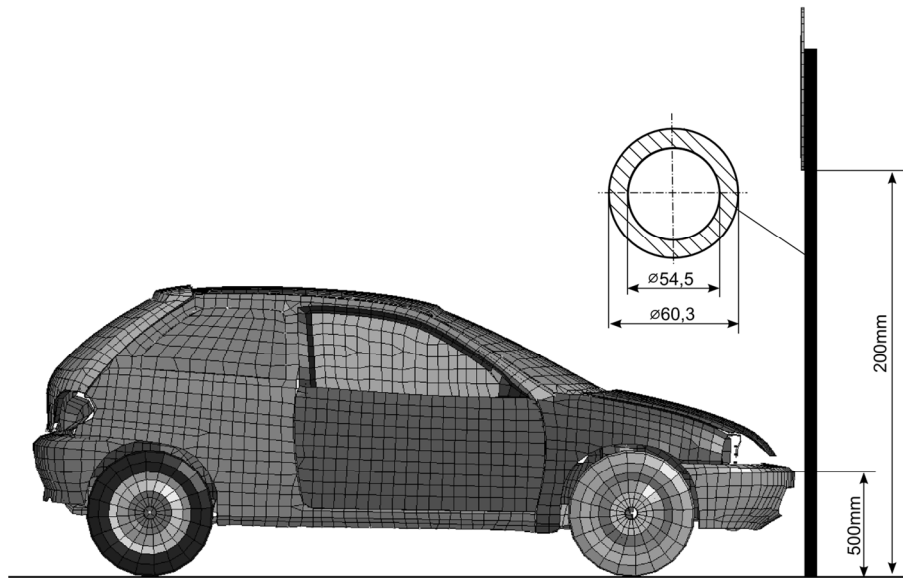
- HE – konstrukcje pochłaniające energię w wysokim stopniu,
- LE – konstrukcje pochłaniające energię w niewielkim stopniu,
- NE – konstrukcje niepochłaniające energii.

Konstrukcje niepochłaniające energii (NE), spełniające wymogi omawianej normy, zapewniają mniejsze ryzyko wystąpienia obrażeń u poszkodowanych niż konstrukcje pochłaniające energię mieszczące się w kategoriach HE i LE.

2. ANALIZA NUMERYCZNA

Przeprowadzona analiza numeryczna miała na celu określenie wad i zalet poszczególnych sposobów modelowania elementów konstrukcji wsporczych

znaków drogowych, między innymi takich, jak pionowe słupy do montowania znaków czy elementy kratownic bram drogowych. Eksperyment polegał na zamodelowaniu zdarzenia, podczas którego pojazd uderza w pojedynczy słup o profilu rurowym o wymiarach 2600 mm × 60,3/2,9 mm (wys. × śr.zew/gr.ścianki), na szczycie którego zamocowano znak drogowy o średnich gabarytach. Wysokość zamocowania oraz wymiary znaku drogowego określone zostały na podstawie informacji zawartych w załączniku nr 1 do Dziennika Ustaw Nr 220 poz. 2181 [3]. Wymiary charakterystyczne przedstawiono na rysunku 1.

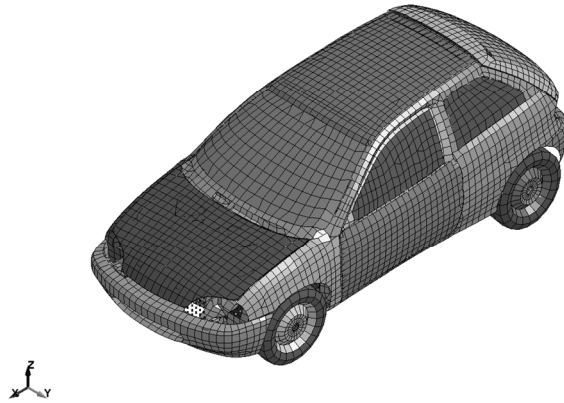


Rys. 1. Wymiary charakterystyczne
Fig. 1. Characteristic dimensions

2.1. Model pojazdu

Model numeryczny pojazdu wykorzystanego podczas eksperymentu, oznaczony jako GM_R4, pochodzi z upubliczniczonych zasobów Narodowego Centrum Analiz Zderzeniowych (National Crash Analysis Center) w Stanach Zjednoczonych. Model został przebudowany w taki sposób, aby spełniał wymogi normy PN-EN 12767 dotyczące warunków testowania elementów wsporczych infrastruktury drogowej. Model dostosowany do przeprowadzenia testów zderzeniowych zgodnie z normą został dostarczony przez firmę Lier (Francja). W środku ciężkości pojazdu umieszczono sześciąt zbudowany z sześciu elementów powłokowych typu *SHELL z przydzielonym materiałem typu *RIGID. Kostka ta pełni funkcję akcelerometru oraz służy do odczytu wielkości kinematycznych w lokalnym układzie współrzędnych. Masa całkowita pojazdu została dostosowana do wymogów normy i wynosi 0,9 Mg. Na rysunku 2 przedstawiono siatkę elementów składającą się na model GM_R4.

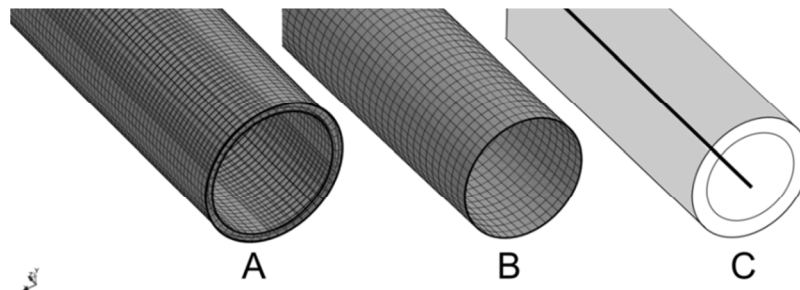
LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost



Rys. 2. GM_R4 – Siatka elementów
Fig. 2. GM_R4 – Mesh of finite elements

2.2. Model słupa ze znakiem drogowym

Na potrzeby eksperymentu przygotowano trzy odrębne modele słupa wraz ze znakiem drogowym średniej wielkości (kat. S). Różnice pomiędzy poszczególnymi przypadkami polegały na wykorzystaniu różnego typu elementów do zamodelowania słupa wsporcze. Wszystkie przypadki przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Sposoby modelowania słupa wsporcze
Fig. 3. Methods for modeling the support pole

W przypadku A słup zamodelowano z wykorzystaniem elementów bryłowych SOLID. Są to elementy trójwymiarowe, mające trzy translacyjne stopnie swobody. Opisane są poprzez funkcję kształtu pierwszego i drugiego rzędu. Każdy element ma osiem węzłów. Łączna liczba elementów bryłowych, składająca się na siatkę elementów skończonych słupa, to 100000. Dla elementów zdefiniowano kartę *SECTION_SOLID z nastawami ELFORM = 1 z jednym punktem całkowania [4].

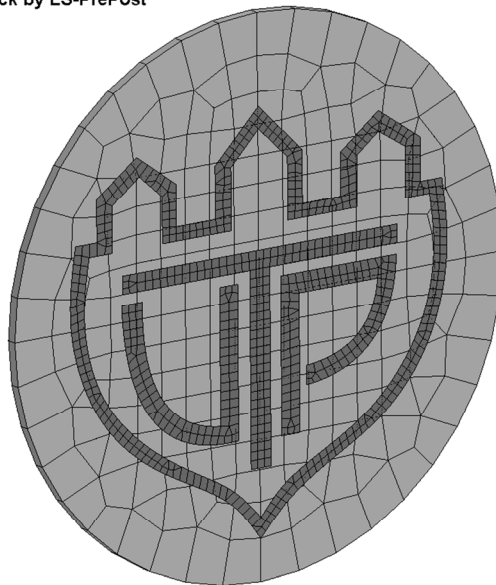
W przypadku B słup zamodelowano z wykorzystaniem jednowymiarowych elementów belkowych BEAM. Mają one 6 stopni swobody (3 translacyj-

ne, 3 rotacyjne). Przyjmuje się, iż w przypadku elementów typu BEAM nie dochodzi do odkształcenia w przekroju poprzecznym podczas deformacji. Elementy belkowe są elementami dwuwęzłowymi. Trzeci dodatkowy węzeł jest węzłem kierunkowym informującym o położeniu zdefiniowanego przekroju elementu. Dla elementów zdefiniowano kartę *SECTION_BEAM z nastawami ELFORM = 4 [4]. Łączna liczba elementów skończonych typu belkowego składająca się na model słupa to 500.

W przypadku C słup zamodelowano z wykorzystaniem elementów powłokowych. Są to elementy dwuwymiarowe mające pięć stopni swobody (3 translacyjne, 2 rotacyjne – brak możliwości obrotu wokół normalnej do płaszczyzny powłoki). Elementy powłokowe opisane są za pomocą funkcji kształtu pierwszego i drugiego rzędu. Dla elementów zdefiniowano kartę *SECTION_SHELL z nastawami ELFORM = 16 (4 punkty całkowania), dodatkowo w celu kontroli sztywności wyboczenia zdefiniowano kartę *HOURGLASS opisaną parametrami HQ = 8 [4]. Łączna liczba elementów powłokowych składająca się na siatkę elementów skończonych słupa to 25000.

Znak umieszczony na maszcie został zamodelowany z wykorzystaniem elementów powłokowych. Nie będzie on jednak przedmiotem tego opracowania. Na rysunku 4 przedstawiono siatkę elementów naniesioną na znak oraz wskazano część pośredniczącą mocującą znak do słupa.

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost



Rys. 4. Znak kat. S (średniej wielkości) – siatka elementów
Fig. 4. Sign cat. S (medium size) – mesh of finite elements

Do słupa i znaku przypisano materiał sprężysto-plastyczny z modelem uszkodzenia, którego kryterium jest wartość odkształcenia. Materiał został zdefiniowany w karcie *MAT_PLASTIC_KINEMATIC (#003). Jest to materiał dwuliniowy, z możliwością uszkodzenia na podstawie kryterium, jakim jest procentowa wartość odkształcenia elementu [4]. Nastawy dla materiału zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Cechy materiałowe
Table 2. Material properties

Parametr	Symbol	Wartość
Gęstość	RO	7900 [kg·m ⁻³]
Moduł Younga	E	210000 [MPa]
Wsp. Poissona	PR	0,3
Granica plastyczności	SIGY	390 [MPa]
Kryterium uszkodzenia	FS	0,2%

2.3. Warunki brzegowe i kontakty

Słup utwierdzony został na podłożu poprzez odebranie wszystkich stopni swobody węzłom znajdującym się w jego dolnej części. Połączenie pomiędzy znakiem a masztem wykonano z wykorzystaniem pośredniczącej części typu *RIGID, do której przypisano węzły znajdujące się u góry masztu oraz wybrane węzły elementów znaku.

Kontakt pomiędzy pojazdem a słupem zdefiniowano za pomocą karty *CONTACT_AUTOMATIC_NODES_TO_SURFACE. W karcie kontaktu pozostawiono domyślne wartości nastaw.

Dodatkowo w przypadku C wykorzystano kartę *CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE zdefiniowaną dla słupa, aby zdefiniować kontakt pomiędzy elementami w obrębie jednej części.

Przestrzeń eksperymentu została ograniczona w dolnej płaszczyźnie poprzez kartę *RIGIDWALL_PLANAR.

Prędkość początkowa pojazdu została zdefiniowana za pomocą karty *INITIAL_VELOCITY_GENERATION, nadając nodom należącym do kół prędkość liniową równą 9722,22 mm·s⁻¹ oraz kątową względem osi kół równą 31,21 rad·s⁻¹.

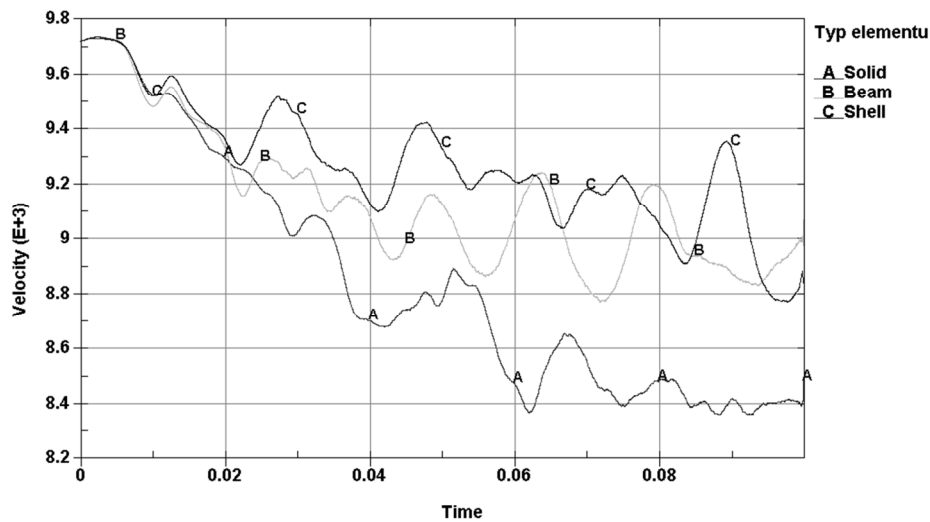
3. ANALIZA WYNIKÓW

Przyjętymi kryteriami oceny były dwa parametry: prędkość końcowa po uderzeniu oraz czas obliczeniowy potrzebny na przeprowadzenie analizy w zadanym przedziale czasu. Jako dodatkowy element oceny przyjęto organoleptyczną ocenę odkształcenia słupa po jego uszkodzeniu u podstawy.

Na rysunku 5 przedstawiono wykres zmian prędkości w czasie dla poszczególnych przypadków.

Jak widać, różnice pomiędzy nimi są niewielkie. Rozbieżność zwiększa się z chwilą uszkodzenia słupa u podstawy. Niemniej jednak przyjęć można, że pod

względem wartości różnice mieszczą się w granicach dopuszczalnego błędu. Na podstawie wykresu, zakładając największą dokładność elementów typu SOLID, wnioskować można, dużą zbieżność wyników dla modelowania słupów elementami typu BEAM, SHELL i SOLID.



Rys. 5. Zmiana prędkości w funkcji czasu
 Fig. 5. Speed change as a function of time

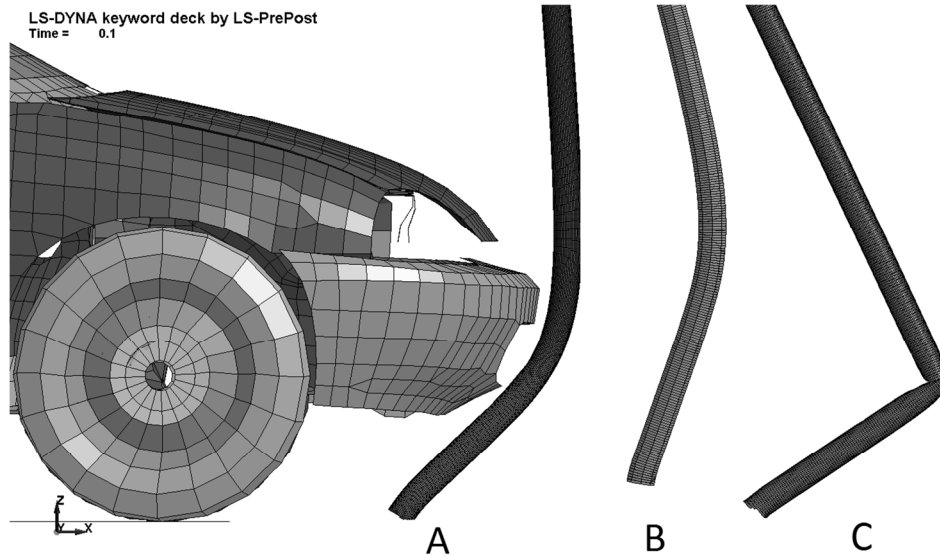
Czas potrzebny do przeprowadzenia analizy dla poszczególnych przypadków przedstawiono w tabeli 3. Różnice są znaczące. Kryterium to jest bardzo istotne ze względu na badania wielu prototypów i prowadzenie studium parametrycznego. Dzięki zmniejszeniu czasu obliczeń potrzebnego do rozwiązania jednego zestawu danych wejściowych możliwe staje się przeprowadzenie rozbudowanego studium przypadku dla wielu różnych wartości zmiennych. Staje się to istotne w chwili walidacji modelu, gdy porównuje się uzyskane rezultaty z wynikami eksperymentu na obiekcie fizycznym. Ze względu na kryterium czasu obliczeń najbardziej rozsądnym zdaje się być wykorzystanie elementów belkowych.

Tabela 3. Czas potrzebny do przeprowadzenia analizy
 Table 3. Time required for analysis

Przypadek	Czas analizy [s]
A (solid)	22070
B (beam)	1251
C (shell)	4647

Na rysunku 6 przedstawiono odkształcenie słupów. Kryterium uszkodzenia była wartość odkształcenia przekraczającego 2%. Do uszkodzenia we wszystkich trzech przypadkach doszło w tym samym kroku obliczeń. Jak można zau-

ważyć, poszczególne fotografie przedstawiające różne sposoby zamodelowania słupa wsporczego są do siebie zbliżone.



Rys. 6. Odształcenie w chwili uszkodzenia
Fig. 6. The deformation at the time of damage

4. WNIOSKI

Analiza numeryczna zjawisk dynamicznych zyskuje coraz szersze zastosowanie. W przypadku konstrukcji wsporczych elementów infrastruktury drogowej można przeanalizować sposób zachowania się poszczególnych konstrukcji jeszcze przed wyprodukowaniem prototypu. Pozwala to nie tylko na wspomaganie procesu konstrukcyjnego, ale również na przewidywanie skutków bądź analizę przyczyn mogących zaistnieć zdarzeń drogowych.

Przeprowadzona analiza rozpatrywanego przypadku zderzenia pojazdu ze słupem znaku drogowego miała na celu wskazanie typu elementu, który przy zadanych parametrach jest najbardziej odpowiedni do modelowania takich struktur. Na podstawie przedstawianych wyników stwierdzono, że najbardziej odpowiednim spośród analizowanych jest przypadek B – z wykorzystaniem elementów belkowych

Należy przy tym jednak zaznaczyć, że na podstawie przedstawionych wyników nie można tego stwierdzić jednoznacznie. W przypadku analiz zjawisk szybkozmiennych nieodzownym elementem jest przeprowadzenie walidacji modelu. Pozwoli to na weryfikację, czy zbudowany model zachowuje się w sposób odpowiedni w odniesieniu do rzeczywistości. Bez tego typu działań przyjmowanie wyników symulacji za ostateczne jest wysoce ryzykowne.

LITERATURA

- [1] BARCIK J., CZECH P.: Wpływ infrastruktury drogowej na bezpieczeństwo ruchu – część 1. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Gliwice 2010.
- [2] BOROVIŠEK M., VEŠENJAK M., ULBIN M., REN Z.: Simulating the impact of a truck on a road safety barrier. Journal of Mechanical Engineering, Lublana 2006.
- [3] Dz.U. z 2003 r. Nr 220, poz. 2181, załącznik nr 1, Szczegółowe warunki techniczne dla znaków drogowych pionowych i warunki ich umieszczania na drogach.
- [4] LS-DYNA Keyword User's Manual Volumes I and II, Sierpień 2012, Wersja 971 R6.1.0, Livermore Software Technology Corporation.
- [5] MATEJ V., MATEJ B., ZORAN R.: Computational simulation of road safety barriers using LS-DYNA. Forum użytkowników LS-Dyna, Frankenthal 2012.
- [6] SCHABOWSKI J.: Skuteczność i efektywność drogowych urządzeń bezpieczeństwa biernego. Międzynarodowe Seminarium Bezpieczeństwa Ruchu Drogowego – GAMBIT, Gdańsk 2012.

METHODS OF MODELING OF ROAD'S INFRASTRUCTURE SUPPORT ELEMENTS

Summary: This paper presents some ways of modeling the supporting pole for a traffic sign in the LS-Dyna. An attempt was made to demonstrate the advantages and disadvantages for each solution. Analysis is focused on the modeling method, whereas the the remaining elements of construction are simplified.

Key words: LS-Dyna, FEM, support elements, passive safety