

MODELING OF THE BUS SUPERSTRUCTURE IN ORDER TO CONFIRM REQUIREMENTS OF 66 ECE REGULATION

Wacław Borkowski

Military University of Technology
ul. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, Poland
tel.: +48 22 6839531, fax: +48 22 6837370
w.borkowski@wme.wat.edu.pl

Zdzisław Hryciów

Military University of Technology
ul. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, Poland
tel.: +48 22 6839739, fax: +48 22 6837382
zhryciow@wat.edu.pl

Abstract

In the paper chosen questions relating to the large passenger vehicles loss of motion stability are introduced. An attention to following hazard from the passive safety point of view is paid. A valid regulation concerning the approval of large passenger vehicles with regard to the strength of their superstructure, as well as the ECE Regulation 66 basic requirements are presented. A shape and dimensions of minimum residual space for driver as well as transported passengers are given. The most often applied methods of strength test according to the ECE Regulation 66 are given – a roll-over test on a complete vehicle and on its representative body section. A procedure of roll-over test on a complete bus is described, as well as its indispensable modifications in reference to numerical simulation. The basic dependences describing initial conditions of numerical simulation are given.

In the paper the differences between results of two alternative methods are estimated. The description of bus discrete model is introduced, as well as chosen segment of its superstructure. The type of elements, materials and loading conditions of construction applied to numerical simulations are described. The chosen results of numeric simulations are presented - the maximum deformations of superstructures of studied objects, and reduced stress in construction. The comparisons of results for complete bus and segment of its construction are executed.

Keywords: motor vehicle, bus, strength of superstructure, methods of investigations, numerical simulation

MODELOWANIE STRUKTURY NOŚNEJ AUTOBUSU W ASPEKCIE SPRAWDZENIA WYMAGAŃ REGULAMINU 66 EKG

Streszczenie

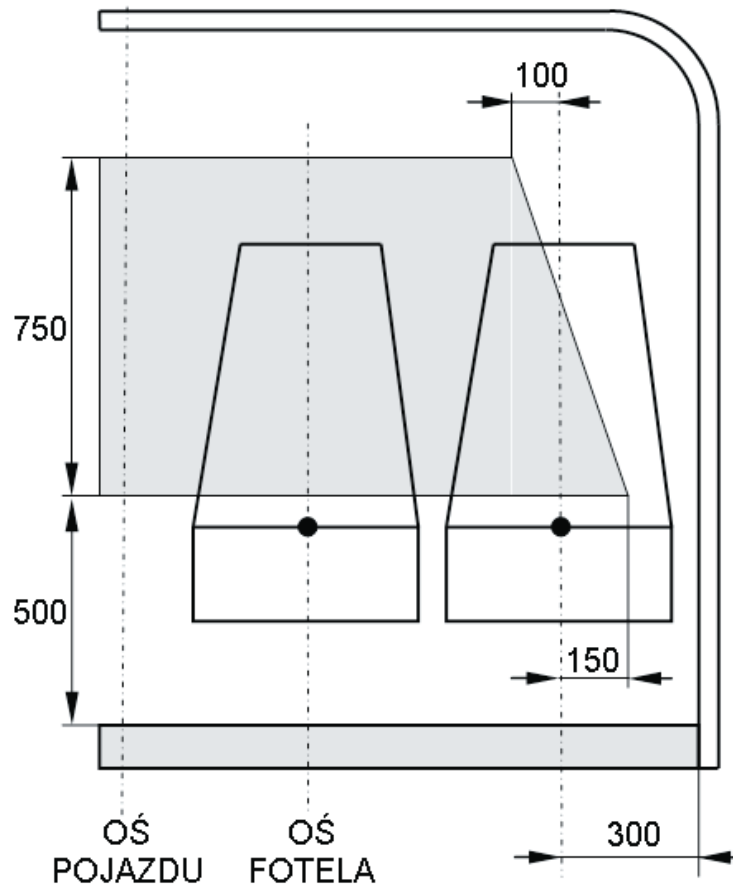
W pracy przedstawiono wybrane zagadnienia dotyczące utraty stateczności pojazdów transportu zbiorowego. Podano związane z nią zagrożenia z punktu widzenia bezpieczeństwa biernego. Podano obowiązujące przepisy dotyczące homologacji dużych pojazdów do przewozu osób w zakresie wytrzymałości ich konstrukcji, a także zamieszczono podstawowe wymagania Regulaminu 66 EKG. Podano kształt i wymiary minimalnej przestrzeni przeżycia dla kierowcy oraz przewożonych pasażerów. Podano także najczęściej stosowane metody prowadzenia prób wytrzymałościowych zgodnie z Regulaminem 66 EKG – przewrócenie kompletnego pojazdu oraz przewrócenie reprezentatywnej jego części. Opisano procedurę prowadzenia próby przewrotu na kompletnym autobusie, a także jej niezbędne modyfikacje w odniesieniu do symulacji numerycznej. Podano podstawowe zależności opisujące warunki początkowe symulacji numerycznej.

W pracy oszacowano różnice w wynikach otrzymywanych dwoma alternatywnymi metodami. Przedstawiono opis modelu dyskretnego autobusu, jak również wybranego segmentu jego struktury nośnej. Opisano przyjęte do obliczeń elementy, materiały oraz warunki obciążenia konstrukcji. Zamieszczono wybrane rezultaty symulacji numerycznych – maksymalne deformacje struktur nośnych badanych obiektów, a także występujące w nich naprężenia. Dokonano porównania wyników dla kompletnego autobusu oraz segmentu konstrukcji.

Słowa kluczowe: pojazd mechaniczny, autobus, wytrzymałość struktury nośnej, metody badań, symulacja numeryczna

1. Wstęp

Jednym z ważniejszych zadań stojących przed projektantami pojazdów jest zapewnienie bezpieczeństwa przewożonych osób. W szczególności nabiera to znaczenia w odniesieniu do pojazdów transportu zbiorowego. Ze względu na liczbę przewożonych osób, każdy wypadek drogowy stanowi poważne zagrożenie i może skutkować znaczną liczbą ofiar. Jednym z najbardziej niebezpiecznych jest przypadek wywrotu autobusu na bok lub na dach. W takiej sytuacji dochodzi do dużych deformacji dachu oraz ściany bocznej, prowadzących zwykle do poważnych obrażeń. Z tych też względów konieczne jest odpowiednie kształtowanie konstrukcji pojazdu tak, aby jego ustrój nośny był w stanie zamortyzować uderzenie spowodowane wywróceniem się autobusu poprzez stopniowe odkształcanie elementów konstrukcji. Z drugiej strony odkształcenia te nie mogą być zbyt duże. Doprowadziłyby to do naruszenia minimalnej przestrzeni przeżycia dla kierowcy oraz przewożonych pasażerów. Kształt i wymiary przestrzeni chronionej są określone w Regulaminie 66 [4] oraz przedstawione na Rys. 1.



Rys. 1. Przestrzeń chroniona
Fig. 1. Residual space

Na podstawie przepisów obowiązujących od 15 stycznia 2004 wszystkie pojazdy, przeznaczone do przewozu więcej niż 16 pasażerów, muszą zostać poddane badaniom oraz spełnić wymagania dotyczące wytrzymałości konstrukcji nośnej zgodnie z Regulaminem 66 EKG ONZ „Jednolite przepisy dotyczące homologacji dużych pojazdów do przewozu osób w zakresie wytrzymałości konstrukcji” [4]. Przepisy regulaminu dotyczą obecnie projektowanych pojazdów oraz tych, które są homologowane po podanej powyżej dacie. Regulamin 66 określa, że konstrukcja nośna autobusu powinna być dostatecznie wytrzymała, aby podczas badania jedną z podanych w nim metod badawczych lub po obliczeniach przeprowadzonych zgodnie z zawartym w nim opisie:

- żadna przemieszczana część pojazdu nie znalazła się w przestrzeni chronionej, przedstawionej na Rys. 1,
- żadna część przestrzeni chronionej nie wysunęła się na zewnątrz odkształconej konstrukcji.

Regulamin 66 podaje cztery możliwe do zastosowania metody prób wytrzymałościowych pojazdów transportu zbiorowego. Podjęcie decyzji o zastosowaniu konkretnej metody leży w kompetencji producenta, który może jednak posiłkować się wytycznymi organu homologującego. Do najczęściej stosowanych prób należy zaliczyć:

- przewrócenie kompletnego pojazdu zgodnie z procedurą podaną w załączniku 3 do Regulaminu 66 EKG,
- przewrócenie segmentu nadwozia lub części reprezentujących kompletny pojazd zgodnie z załącznikiem 4 do Regulaminu 66 EKG.

Pierwsza metoda cechuje się największą wiarygodnością otrzymywanych wyników, ale także najwyższym kosztem przeprowadzenia próby. Koszty badań są zdecydowanie niższe w przypadku zastosowania drugiej metody. Niestety wydzielenie z konstrukcji autobusu reprezentatywnego wycinka (segmentu) jest zadaniem trudnym, a otrzymane wyniki mogą być obciążone dużym oraz trudnym do oszacowania błędem. Z tych też względów w poniższej pracy podjęto próbę oszacowania różnic w wynikach otrzymywanych dla tych dwóch alternatywnych metod badawczych.

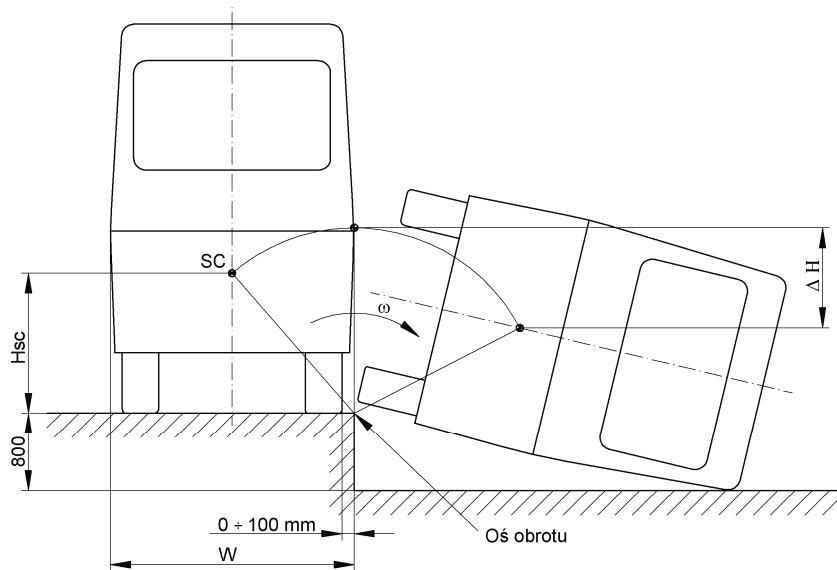
Badania przeprowadzono w oparciu o modele numeryczne wykorzystujące metodę elementów skończonych. Przydatność tej metody jest w literaturze szeroko prezentowana [2, 3], a użyte w obliczeniach modele konstrukcji oraz sposoby jej obciążania zostały pozytywnie zweryfikowane [1].

2. Model numeryczny

2.1. Sposób prowadzenia próby

Procedura przeprowadzania próby przewrotu autobusu przedstawiona jest w załączniku 3 do Regulaminu 66 EKG. Pojazd na całej swojej długości powinien być równomiernie przechylany bez wahań i zjawisk dynamicznych do momentu utraty stateczności poprzecznej. Prędkość kątowna przechylania nie powinna przekraczać 5 stopni na sekundę. W dalszym etapie pod wpływem działania siły ciężkości pojazd przewraca się, wykonując obrót wokół osi równoległej do osi podłużnej pojazdu, a w końcowej fazie uderza w podłoże (Rys. 2.).

W obliczeniach numerycznych ze względu na długi czas trwania analizy dynamicznej często pomija się fazę swobodnego przewrotu, a obliczenia rozpoczyna się w chwili poprzedzającej styk konstrukcji z podłożem. Takie podejście wymaga określenia warunków początkowych analizy – prędkości kątowej pojazdu względem osi obrotu. Wyznacza się ją poprzez porównanie energii kinetycznej z różnicą energii potencjalnych wynikających z położenia środka ciężkości w chwili jego najwyższego położenia oraz chwili kontaktu pojazdu z podłożem.



Rys. 2. Warunki próby.
Fig. 2. Test conditions.

Wartość zmiany energii potencjalnej określona jest zależnością:

$$\Delta E_p = M \cdot g \cdot \Delta H, \quad (1)$$

gdzie:

- M – masa autobusu (segmentu) [kg],
- g – przyspieszenie ziemskie [m/s^2],
- ΔH – zmiana położenia środka ciężkości [m].

Przy założeniu całkowitej zamiany energii potencjalnej na energię kinetyczną, wartość prędkości kątowej autobusu w płaszczyźnie jego obrotu, można wyznaczyć z zależności:

$$\omega = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta E_p}{J_{xx}}}, \quad (2)$$

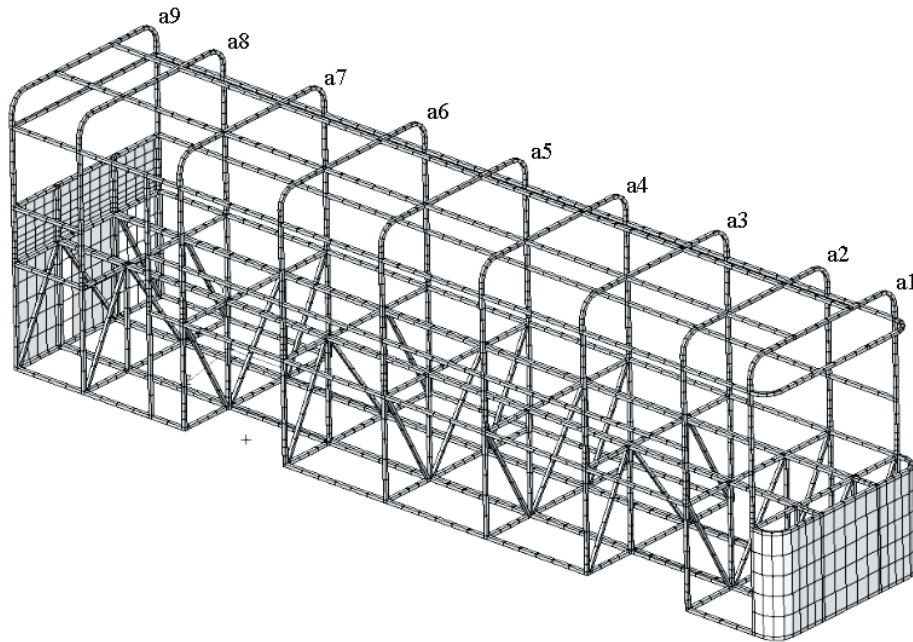
gdzie:

- ΔE_p – przyrost energii potencjalnej [J],
- J_{xx} – masowy moment bezwładności względem osi obrotu [kgm^2].

2.2. Model autobusu

Model dyskretny konstrukcji autobusu przedstawiony jest na Rys. 3. Całość konstrukcji została zamodelowana przy użyciu czterowęzłowych elementów powłokowych. Ze względu na możliwość wystąpienia w trakcie obliczeń znacznych odkształceń konstrukcji oraz uplastycznienia materiału, zastosowane do budowy modelu elementy są dostosowane do obliczeń z uwzględnieniem nieliniowych charakterystyk materiałów oraz nieliniowości geometrycznych.

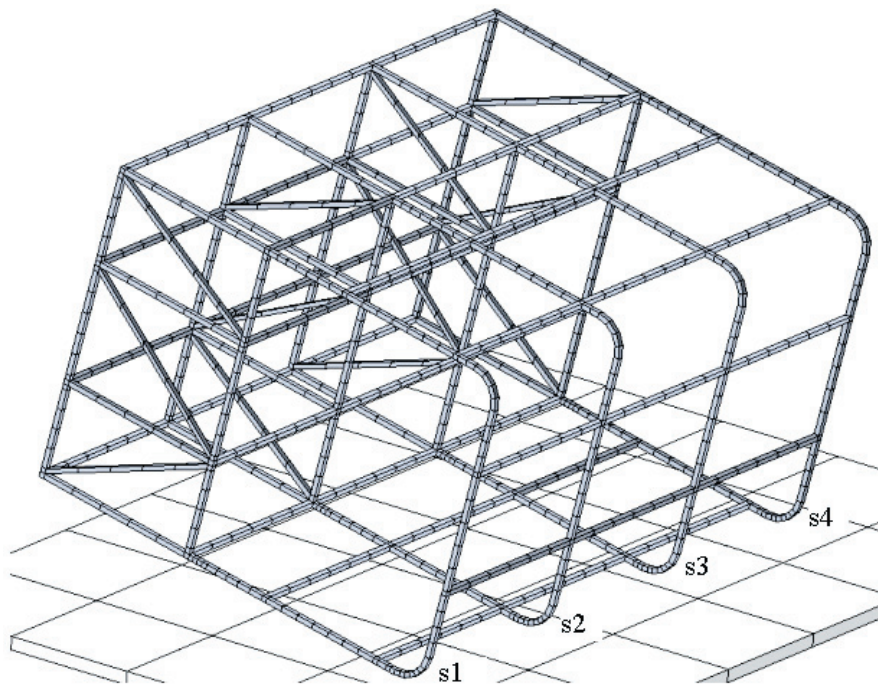
Obciążenie konstrukcji stanowi siła bezwładności pochodząca od opóźnienia ruchu konstrukcji, mającego miejsce w momencie uderzenia o podłoże. Na podstawie danych masowych autobusu przy wykorzystaniu zależności (2) wyznaczono prędkość kątową przed uderzeniem. Wzajemne oddziaływanie elementów autobusu oraz elementów podłoża zrealizowane jest poprzez zdefiniowanie warunków kontaktu. W obliczeniach uwzględniona jest także siła tarcia działająca pomiędzy przemieszczającą się konstrukcją a podłożem. Na wszystkie elementy konstrukcji działa przyspieszenie ziemskie. Symulacja była przeprowadzana do chwili ustania ruchu, tak więc uzyskano w czasie jej trwania wystąpienie maksymalnych deformacji.



Rys. 3. Model dyskretny autobusu
Fig.3. Numerical model of a bus

2.3. Model segmentu

Model segmentu przedstawiony jest na Rys.4. Powstał on poprzez wydzielenie środkowego fragmentu autobusu (wręgi nr a3 do a6 z Rys.3.). Elementy użyte do jego budowy są identyczne jak w przypadku autobusu, taki sam jest również przyjęty model materiału. Wysokość położenia środka masy jest taka sama, a masa segmentu oraz moment bezwładności względem osi obrotu są proporcjonalne do długości konstrukcji. W odróżnieniu od autobusu przednia i tylna ściana nie posiada żadnych wzmocnień. Warunki prowadzenia symulacji były identyczne jak w przypadku autobusu.

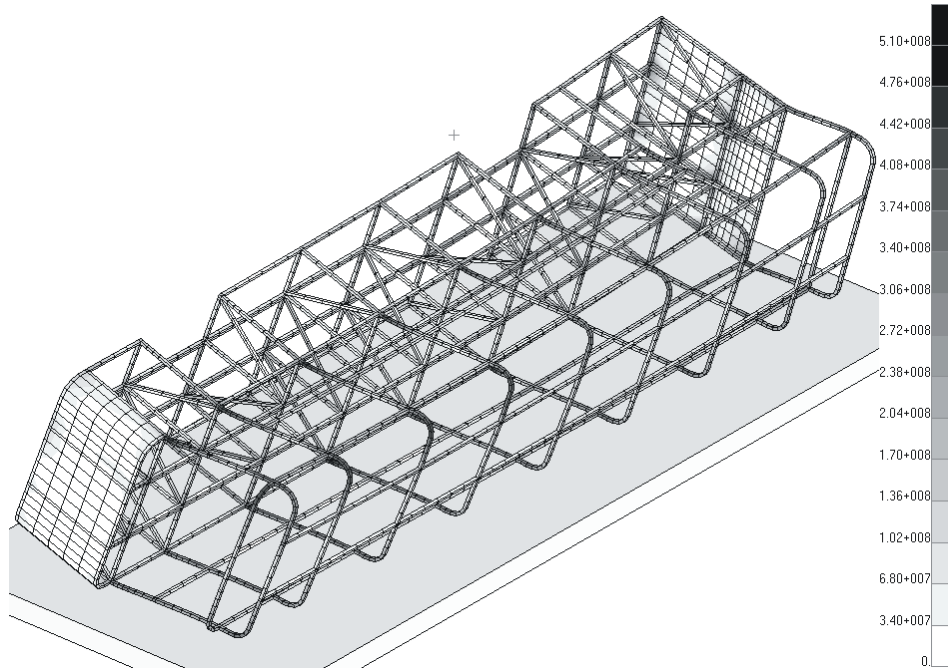


Rys. 4. Model dyskretny segmentu
Fig. 4. Numerical model of a section

3. Wyniki badań

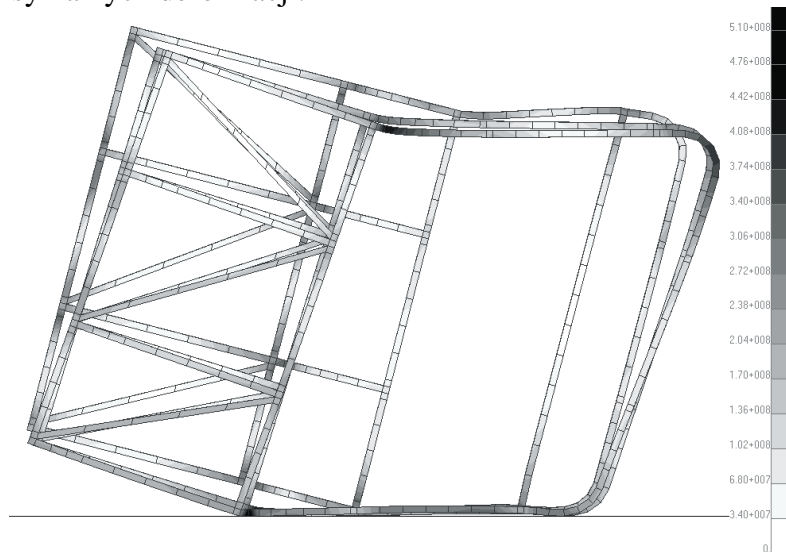
W efekcie przeprowadzonych obliczeń numerycznych dla przyjętych modeli otrzymano postacie deformacji konstrukcji, odkształcenia elementów oraz występujące w nich naprężenia zredukowane według hipotezy Hubera-Misesa dla poszczególnych chwil czasu.

Na Rys.5. przedstawiony jest ogólny widok zdeformowanej konstrukcji autobusu z naniesionymi warstwicami naprężeń zredukowanych dla chwili wystąpienia maksymalnych deformacji konstrukcji. Ze względu na dodatkowe elementy ściany tylnej i przedniej na rysunku tym można zaobserwować skręcanie konstrukcji autobusu wzdłuż jego osi podłużnej. Efektem tego jest różna wielkość deformacji występująca na poszczególnych wręgach.



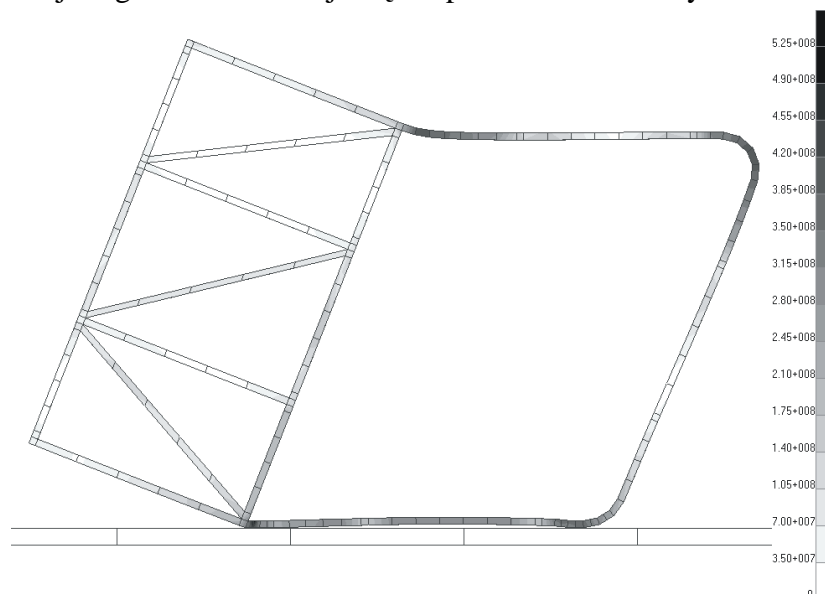
Rys. 5. Deformacje i naprężenia zredukowane struktury nośnej autobusu
 Fig. 5. Deformation and reduced stress of the bus superstructure

Efekt ten jest lepiej widoczny na Rys.6. Przedstawione są na nim deformacje i naprężenia zredukowane wybranych elementów konstrukcji autobusu (wręgi a3, a6 i a9) dla chwili wystąpienia maksymalnych deformacji.



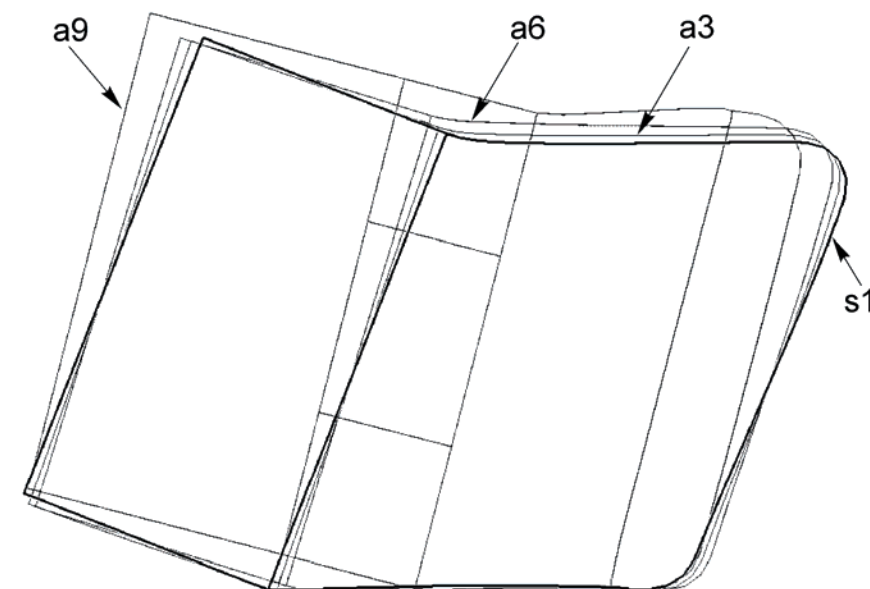
Rys. 6. Deformacje i naprężenia zredukowane wybranych fragmentów konstrukcji autobusu
 Fig. 6. Deformation and reduced stress of the chosen elements of the bus superstructure

Na Rys.7. przedstawiono zdeformowaną wręgę segmentu wraz z naniesionymi warstwicami naprężeń zredukowanych. Należy podkreślić, że w odróżnieniu od autobusu, przyjęta konstrukcja segmentu deformuje się w sposób równomierny.



Rys. 7. Deformacje i naprężenia zredukowane wybranych fragmentu segmentu
 Fig. 7. Deformation and reduced stress of the chosen elements of the section

W celu porównania otrzymanych wyników wykonano zestawienie zdeformowanych wręg autobusu (a3, a6 i a9) i segmentu (s1 – linia pogrubiona) dla wybranej chwili czasu. Przedstawione jest ono na Rys.8.



Rys. 8. Deformacje elementów konstrukcji autobusu i segmentu
 Fig. 6. Deformation of the chosen elements of the bus and section structure

Na podstawie otrzymanych wyników należy stwierdzić, że ze względu na mniejszą sztywność konstrukcja segmentu ulega większym deformacjom. Wręgi autobusu a3 i a6 (odpowiadające zewnętrznemu obrysowi segmentu) są skrzycone względem wręgi s1 odpowiednio o kąt około 2 i 5 stopni. Końcowy fragment autobusu (a9) ze względu na odmienną konstrukcję deformuje się w wyżej położonym punkcie.

4. Podsumowanie

Zarówno dla konstrukcji autobusu jak i segmentu największe odkształcenia występują w miejscach łączenia słupków pionowych z podłogą oraz z dachem. W nich również występują maksymalne naprężenia. Naprężenia zredukowane przekraczają dla przyjętego materiału granicę plastyczności, a ich maksymalne wartości przekraczają 500 MPa. Dla konstrukcji segmentu są one o około 5% wyższe niż dla autobusu.

Ze względu na wprowadzone wzmocnienia w ścianie przedniej i tylnej deformacje w strukturze nośnej autobusu na jego długości nie są jednakowe. Zjawiska tego nie obserwuje się w przypadku segmentu. Należy jednocześnie podkreślić, że dla odpowiadających sobie fragmentów obydwu konstrukcji różnice w deformacjach nie przekraczają 10%, zarówno dla przemieszczeń poprzecznych jak i kątowych.

Otrzymane wyniki symulacji świadczą o przydatności metody przewracania segmentu nadwozia. W przypadku stosowania tej metody szczególną uwagę należy zwrócić na wydzielenie wycinka, który będzie reprezentatywny w stosunku do kompletnego pojazdu.

Literatura

- [1] Borkowski, W., Hryciów, Z., Muszyński, A., Sokalski, L., *Weryfikacja numerycznej symulacji przewracania autobusu według Regulaminu 66 EKG ONZ*. Materiały IX Międzynarodowe Sympozjum IPMiT nt. Doskonalenie konstrukcji oraz metod eksploatacji pojazdów mechanicznych "POJAZDY'2005", Warszawa, Polska, pp.71-80, 2005.
- [2] Górski, A., Karliński, J., Kowalczyk, M., Rusiński, E., *Numeryczna symulacja utraty stateczności ruchu autobusu według Regulaminu 66 EKG ONZ*. SYSTEMS Journal of Transdisciplinary Systems Science, Vol 9. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, pp. 418-427, 2004.
- [3] Rusiński, E., *Zasady projektowania konstrukcji nośnych pojazdów samochodowych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej. Wrocław 2002.
- [4] Regulamin nr 66 EKG ONZ, *Jednolite przepisy dotyczące homologacji dużych pojazdów do przewozu osób w zakresie wytrzymałości konstrukcji*.