

## Symulacja komputerowa przy wyborze koncepcji i parametrów układów biegowych autobusu szynowego

Artykuł poświęcony jest analizom symulacyjnym ruchu modeli lekkich pojazdów szynowych (autobusów szynowych) dla wyboru układu biegowego i jego parametrów. Przedstawiono w nim modele fizyczne i matematyczne autobusów jedno i wieloczlónowych oraz możliwe – nominalne ich parametry niezbędne do prowadzonych analiz. Szeroka analiza stateczności biegu, spokojności jazdy, bezpieczeństwa przed wykołaceniem oraz oddziaływania na tor modeli autobusów pozwoliła w zakończeniu przedstawić konfigurację autobusów oraz optymalne parametry układów biegowych dla realizacji określonych zadań przewozowych. Artykuł powstał w wyniku realizacji projektu badawczego KBN 9T12C04919 pt. „Opracowanie i wybór na podstawie badań symulacyjnych układu napędowego i biegowego autobusu szynowego dla ruchu lokalnego”.

### 1. Wprowadzenie

W niniejszym artykule przedstawiono metodę i możliwe do uzyskania na jej bazie wyniki obliczeń, które pozwolą na najkorzystniejszy wybór koncepcji układu biegowego autobusu szynowego w rozwijanych pracach projektowych.

Metoda ta oparta jest na szeroko stosowanej w nauce i praktyce inżynierskiej symulacji komputerowej modeli matematycznych pojazdów szynowych. Jej podstawowym atutem jest możliwość stosunkowo taniego uzyskania wyników sił i przyspieszeń na obiekcie wirtualnym przed rozpoczęciem prac inżyniersko-projektowych. Dodatkową zaletą symulacji komputerowej jest możliwość uzyskania wyników dla wielkości, które w badaniach doświadczalnych są praktycznie nie do uzyskania.

Podstawowym mankamentem metody jest konieczność precyzyjnego definiowania związków matematyczno-fizycznych zachodzących w rozwiązaniach konstrukcyjnych modelowanego pojazdu. Do szczególnie wrażliwych na brak precyzji w definiowaniu tych związków należy para koło-szyna.

Korzystając z tej metody należy posługiwać się programem do symulacji komputerowej, z którego wyniki wielokrotnie się potwierdziły w badaniach doświadczalnych lub przeszły pozytywne porównanie z innymi programami tego typu [6].

### 2. Koncepcje układów biegowych autobusów szynowych

Istnieje wiele możliwych rozwiązań konstrukcyjnych układów jezdnych dla autobusów szynowych. Rozwiązania te podstawowo charakteryzują się budową wózków, ich ilością i rozlokowaniem, a także budową nadwozia, które może być zbudowane z jednego lub więcej członów. Do analiz i oceny wyników wybrano najważniejsze rozwiązania spotykane w praktyce.

Dla przygotowania modeli matematyczno-fizycznych autobusów jedno i wieloczlónowych oraz

sprecyzowania harmonogramu analiz symulacyjnych ich układów biegowych, konieczne było przeanalizowanie parametrów charakteryzujących konstrukcję autobusu, zakres ich zmienności w różnych rozwiązaniach jak również zaproponowanie parametrów wyjściowych (nominalnych). Badania symulacyjne tych układów autobusu dotyczyły następujących dziedzin:

- stateczności biegu,
- spokojności jazdy,
- oddziaływania na tor prosty i zakrzywiony,
- bezpieczeństwa przed wykołaceniem,
- współczynnika pochylenia nadwozia w płaszczyźnie poprzecznej.

#### 2.1. Schemat ogólny

Na podstawie analizy dotychczas istniejących rozwiązań autobusów krajowych i zagranicznych można stwierdzić, że do badań symulacyjnych układów dynamicznych autobusów szynowych powinna być brana pod uwagę rodzina autobusów jedno i wieloczlónowych utworzona według konfiguracji przedstawionej w tabeli 1.

Tabela 1

Układy autobusów

|           |                                                                                                                               |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| s         | Autobus napędny jednoczlónowy o układzie osi A-A lub A-1                                                                      |
| s lub d   | Autobus napędny lub doczepny jednoczlónowy o układzie osi B-B lub 2-2                                                         |
| s + d     | Autobus dwuczónowy złożony z członu napędowego i doczepnego, o układzie osi B-2-B                                             |
| s + d + s | Autobus trózcónowy złożony z dwóch członów napędnych skrajnych i jednego członu doczepnego środkowego, o układzie osi B-2-2-B |
| d + s + d | Autobus trózcónowy złożony z dwóch członów doczepnych skrajnych i jednego członu napędowego środkowego o układzie osi 1-B-1   |

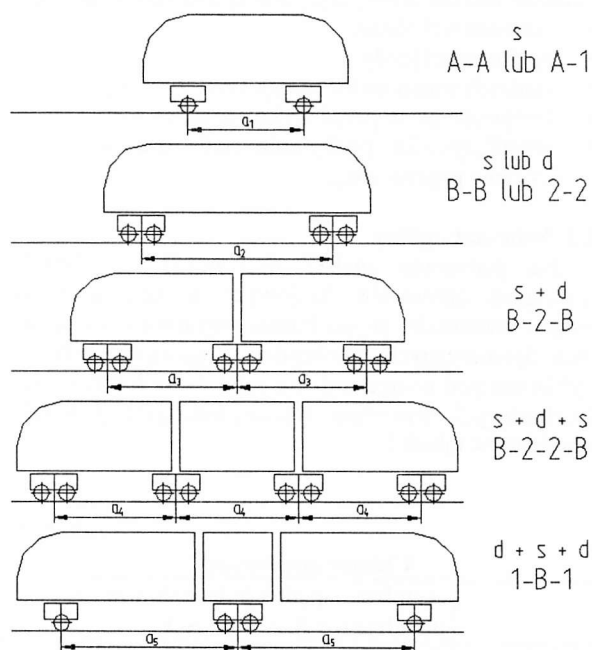
Schemat rodziny rozważanych autobusów przedstawia rys. 1.

Rodzinę autobusów można rozważać niezależnie od wszystkich innych cech ze względu na sposób zawieszenia nadwozia. Spotykane są następujące sposoby zawieszeń:

- zawieszenia dwustopniowe,
- zawieszenia jednostopniowe.

Te drugie chociaż mniej korzystne dla właściwości biegowych, ze względu na zapewnienie mniejszej izolacji nadwozia od przyspieszeń wywołanych nierównościami toru niż zawieszenia dwustopniowe, brane są pod uwagę ze względu na prostotę konstrukcji i koszt pojazdu, szczególnie ważny czynnik w ocenie autobusu.

Cechą ważną, decydującą o ilości rozważanych wariantów rozwiązań jest ponadto układ osi wózka. W rozważanej rodzinie mogą być zastosowane zgodnie z dotychczasowym doświadczeniem krajowym i zagranicznym zarówno wózki dwuosiowe jak i wózki jednoosiowe, przy czym wózki dwuosiowe mogą posiadać układy konwencjonalne jak również prowadzenie radialne oraz elastyczne połączenie maźnic zestawów kołowych półram, układy te zostały z powodzeniem zastosowane w zespole trakcyjnym ICE dla prędkości powyżej 200 km/h.



Rys. 1. Rodzina autobusów jedno i wielo-członowych

Kombinacja tych wózków jest podstawą dla tworzenia rodziny autobusów. Zarówno wózek dwuosiowy jak i jednoosiowy może być wózkiem wyposażonym w napęd jak i bez tego napędu. W związku z tym mamy wózki napędne oraz wózki toczne, których parametry masowe są inne, chociaż podstawowa ich

konstrukcja w zasadzie jest, ze względu na unifikację, taka sama.

Ostatnią cechą, która różnicuje rozważane modele autobusów ze względu na dynamikę jest konstrukcja napędu. Pod uwagę wzięto następujące rodzaje napędów:

- $n_a$  -silnik trakcyjny zawieszony „za nos”, jako konstrukcja klasyczna i najprostsza,
- $n_b$  -silnik trakcyjny zawieszony na ramie wózka lub pojazdu,
- $n_c$  -całkowicie usprężynowany silnik trakcyjny zawieszony wraz z przekładnią na ramie wózka lub pojazdu,
- $n_d$  -przekładnia osiowa z podłużnym wałem Cardana, wprowadzającym do niej moment od silnika (spalinowego lub elektrycznego) zawieszanego na ramie pośredniej, mocowanej do ostoi pojazdu za nos.

Przedstawiony schemat podziału przedstawiono w tabeli 2.

Dla rozważanych układów przedstawionych w tabeli określono do analiz symulacyjnych ich podstawowe parametry nominalne. Ze względu na różnorodność konstrukcji i konieczność poszukiwania rozwiązań optymalnych określone zostały:

- parametry geometryczne,
- parametry mechaniczne,

w zakresie od wartości najmniejszych do największych z punktu widzenia wielkości dopuszczalnych i praktycznie możliwych do realizacji. Parametry te rozpatrzono oddzielnie dla:

- wózków jednoosiowych,
- wózków dwuosiowych, oraz układu nadwozia autobusów.

## 2.1. Parametry nominalne wózka jednoosiowego

Parametry nominalne to przede wszystkim parametry geometryczne, określające wielkość przesuwu poprzecznego wózka względem toru, a także parametry masowe wynikające z nacisku zestawu kołowego na tor i parametry związane ze sztywnością zawieszenia.

Parametry nominalne wózka jednoosiowego z zawieszeniem jedno- i dwustopniowym w odmianach T (wózek toczny) i N (wózek napędny) zostały przedstawione w tabeli 3. Stosownie do wcześniejszych założeń określono ich wartości najmniejsze i największe, wynikające z wielkości dopuszczalnych oraz z dotychczasowej praktyki konstrukcyjnej pojazdów krajowych i zagranicznych. Dla wózka jednoosiowego przewidziano maksymalny nacisk zestawu kołowego na tor 20 Mg, chociaż w nowoczesnych konstrukcjach wielkość ta jest ograniczona do 18 Mg ze względu na małą moc układu napędowego i lekkość pojazdu.

Tabela 2

## Układy (schematy) autobusów do analiz symulacyjnych.

| Wózki       | Zawieszenia jednostopniowe |                    |                 |   |    |   |    |   | Zawieszenie dwustopniowe |                    |                 |   |    |   |    |   |
|-------------|----------------------------|--------------------|-----------------|---|----|---|----|---|--------------------------|--------------------|-----------------|---|----|---|----|---|
|             | Wózki jednoosiowe          |                    | Wózki dwuosiowe |   |    |   |    |   | Wózki jednoosiowe        |                    | Wózki dwuosiowe |   |    |   |    |   |
|             | Wózek toczny<br>T          | Wózek napędny<br>N | WK              |   | WR |   | WJ |   | Wózek toczny<br>T        | Wózek napędny<br>N | WK              |   | WR |   | WJ |   |
|             |                            |                    | T               | N | T  | N | T  | N |                          |                    | T               | N | T  | N | T  | N |
| s           | *                          | *                  |                 |   |    |   |    |   | *                        | *                  |                 |   |    |   |    |   |
| A-A lub A-1 |                            |                    |                 |   |    |   |    |   |                          |                    |                 |   |    |   |    |   |
| s lub d     |                            |                    | *               | * | *  | * | *  | * |                          |                    | *               | * | *  | * | *  | * |
| B-B lub 2-2 |                            |                    |                 |   |    |   |    |   |                          |                    |                 |   |    |   |    |   |
| s + d       | *                          |                    | *               | * | *  | * | *  | * | *                        |                    | *               | * | *  | * | *  | * |
| B-2-B       |                            |                    |                 |   |    |   |    |   |                          |                    |                 |   |    |   |    |   |
| s + d + s   | *                          |                    | *               | * | *  | * | *  | * | *                        |                    | *               | * | *  | * | *  | * |
| B-2-2-B     |                            |                    |                 |   |    |   |    |   |                          |                    |                 |   |    |   |    |   |
| d + s + d   | *                          |                    |                 | * |    | * |    | * | *                        |                    |                 | * |    | * |    | * |
| 1-B-1       |                            |                    |                 |   |    |   |    |   |                          |                    |                 |   |    |   |    |   |

Objaśnienia:

WK - wózek konwencjonalny

d - człon doczepny

WR - wózek radialny

WJ - wózek typu ICE

A - wózek jednoosiowy napędny

T - wózek toczny

B - wózek dwuosiowy napędny

N - wózek napędny z możliwością zabudowy napędów w odmianach  $n_a$ ,  $n_b$ ,  $n_c$ ,  $n_d$ 

1 - wózek jednoosiowy toczny

2 - wózek dwuosiowy toczny

s - człon napędny

\* - wózek zastosowany dla danego układu członów.

Tabela 3

## Parametry nominalne wózków jednoosiowych.

| Lp | Opis wielkości                                                                   | Ozna-<br>czenie | Jedn.       | Zawieszenie<br>jednostop-<br>niowe |   | Zawieszenie<br>dwustopnio-<br>we |   |
|----|----------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-------------|------------------------------------|---|----------------------------------|---|
|    |                                                                                  |                 |             | T                                  | N | T                                | N |
| 1  | Nacisk zestawu kołowego na tor                                                   | $2Q^{(1)}$      | Mg          | 12÷20                              |   |                                  |   |
| 2  | Przesuw poprzeczny między korpusem maźnicy a ramą wózka                          | q               | mm          | 5÷10                               |   |                                  |   |
| 3  | Przesuw poprzeczny nadwozia względem wózka                                       | w               | mm          | 0÷25                               |   | 25÷40                            |   |
| 4  | Masa nieodsprężynowana wózka                                                     | $m_o$           | kg          | 1200÷1400                          |   |                                  |   |
| 5  | Masa nadwozia przypadająca na wózek                                              | $m_N$           | kg          | 4800÷8800                          |   | 4600÷8600                        |   |
| 6  | Ugięcie statyczne zawieszenia jednostopniowego                                   | $f_1$           | mm          | 80÷120                             |   | -                                |   |
| 7  | Ugięcie statyczne drugiego stopnia zawieszenia dwustopniowe-<br>go               | $f_2$           | mm          | -                                  |   | 80÷180                           |   |
| 8  | Ugięcie statyczne zawieszenia dwustopniowego                                     | f               | mm          | -                                  | - | 120÷180                          |   |
| 9  | Stosunek ugięcia zawieszenia pierwszego stopnia do ugięcia<br>sumarycznego f     | $f_1/f$         | -           | -                                  | - | 0,35÷0,6                         |   |
| 10 | Sztywność poprzeczna przy przesuwie zestawu kołowego<br>względem ramy wózka      | $c_{y1}$        | kN/<br>mm   | 2÷20                               |   |                                  |   |
| 11 | Siła poprzeczna przy maks. przesuwie poprzecznym nadwozia<br>względem ramy wózka | $P_H$           | kN          | -                                  | - | $0,1 \cdot m_N \cdot g$          |   |
| 12 | Odległość poprzeczna sprężyn zawieszenia pierwszego stopnia                      | $l_1$           | mm          | 2000                               |   |                                  |   |
| 13 | Odległość poprzeczna sprężyn zawieszenia drugiego stopnia                        | $l_2$           | mm          | -                                  | - | 2000                             |   |
| 14 | Przesuw pionowy do odbijaka w zawieszeniu pierwszego stopnia                     | $L_1$           | mm          | $0,45 \cdot f_1$                   |   |                                  |   |
| 15 | Przesuw pionowy do odbijaka w zawieszeniu drugiego stopnia                       | $L_2$           | mm          | -                                  | - | $0,25 \cdot f_2$                 |   |
| 16 | Współczynnik tłumienia pionowego w zawieszeniu pierwszego<br>stopnia             | $D_{v1}$        | -           | $0,1 \div 0,35$                    |   |                                  |   |
| 17 | Współczynnik tłumienia pionowego w zawieszeniu drugiego<br>stopnia               | $D_{v2}$        | -           | -                                  | - | $0,1 \div 0,35$                  |   |
| 18 | Współczynnik tłumienia poprzecznego w zawieszeniu drugiego<br>stopnia            | $D_{H2}$        | -           | -                                  | - |                                  |   |
| 19 | Sztywność skrętu wózka względem nadwozia w poziomie                              | $c_s$           | kNm/<br>rad | 200÷4000                           |   |                                  |   |

<sup>1)</sup> W stanie służbowym z pasażerami.

### 2.3. Parametry nominalne wózka dwuosowego

Podstawowe parametry nominalne wózków dwuosowych z zawieszeniem dwu-stopniowym zostały zebrane w tabeli 4. Stosownie do wcześniejszych założeń określono ich wartości najmniejsze i największe, wynikające z wielkości dopuszczalnych oraz z dotychczasowej praktyki wózków konstrukcji krajowej i zagranicznej, stosowanych w lekkich pojazdach szynowych.

### 3. Program symulacyjny i modele obliczeniowe

Analizy przeprowadzono zweryfikowanym programem komputerowym ACSL opartym na bibliotece matematycznych procedur w języku FORTRAN 77, który uzupełniono procedurami porządkującymi struktury wielomasowe [6].

Na podstawie szeroko przeprowadzonego rozpoznania literaturowego, udało się wyłonić zakres typów pojazdów szynowych [1], które posiadają cechy autobusów szynowych. Udało się też określić, według jakich przepisów kolejowych są lub będą w niedalekiej przyszłości dopuszczane do eksploatacji takie pojazdy [2].

**Tabela 4**

**Parametry nominalne wózków dwuosowych.**

| L.p. | Opis wielkości                                                                                | Oznaczenie | Jedn.     | T                       |    |    | N          |    |    |
|------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|------------|-----------|-------------------------|----|----|------------|----|----|
|      |                                                                                               |            |           | WK                      | WR | WJ | WK         | WR | WJ |
| 1    | Nacisk zestawu kołowego na tor                                                                | $2Q^{(1)}$ | Mg        | 12÷20                   |    |    |            |    |    |
| 2    | Rozstaw osi wózka                                                                             | p          | m         | 1,8÷2,7                 |    |    |            |    |    |
| 3    | Przesuw poprzeczny zestawu kołowego względem wózka                                            | q          | mm        | 5÷10                    |    |    |            |    |    |
| 4    | Przesuw poprzeczny nadwozia względem ramy wózka                                               | w          | mm        | 25÷40                   |    |    |            |    |    |
| 5    | Masa nieodsprężynowana wózka                                                                  | $m_o$      | kg        | 2000÷2400               |    |    |            |    |    |
| 6    | Masa nadwozia obciążająca wózek                                                               | $m_N$      | kg        | 9400÷17400              |    |    | 9000÷17000 |    |    |
| 7    | Ugięcie statyczne drugiego stopnia zawieszenia                                                | $f_2$      | mm        | 80÷180                  |    |    |            |    |    |
| 8    | Ugięcie statyczne zawieszenia dwustopniowego                                                  | f          | mm        | 120÷180                 |    |    |            |    |    |
| 9    | Stosunek ugięcia statycznego zawieszenia pierwszego stopnia ( $f_1$ ) do ugięcia sumarycznego | $f_1/f$    | -         | 0,35÷0,6                |    |    |            |    |    |
| 10   | Sztywność poprzeczna przy przesuwie zestawu kołowego względem ramy wózka                      | $c_{y1}$   | kN/mm     | 2÷40                    |    |    |            |    |    |
| 11   | Siła poprzeczna przy maks. przesuwie nadwozia względem ramy wózka                             | $P_H$      | kN        | $0,1 \cdot m_N \cdot g$ |    |    |            |    |    |
| 12   | Odległość poprzeczna sprężyn zawieszenia pierwszego stopnia                                   | $l_1$      | mm        | 2000                    |    |    |            |    |    |
| 13   | Odległość poprzeczna sprężyn zawieszenia drugiego stopnia                                     | $l_2$      | mm        | 2000                    |    |    |            |    |    |
| 14   | Przesuw pionowy do odbijaka w zawieszeniu pierwszego stopnia                                  | $L_1$      | mm        | $0,45 \cdot f_1$        |    |    |            |    |    |
| 15   | Przesuw pionowy do odbijaka w zawieszeniu drugiego stopnia                                    | $L_2$      | mm        | $0,25 \cdot f_2$        |    |    |            |    |    |
| 16   | Współczynnik tłumienia pionowego w zawieszeniu pierwszego stopnia                             | $D_{v1}$   | -         | 0,1÷0,35                |    |    |            |    |    |
| 17   | Współczynnik tłumienia pionowego w zawieszeniu drugiego stopnia                               | $D_{v2}$   | -         |                         |    |    |            |    |    |
| 18   | Współczynnik tłumienia poprzecznego w zawieszeniu drugiego stopnia                            | $D_{H2}$   | -         |                         |    |    |            |    |    |
| 19   | Sztywność skrętu zestawu kołowego względem ramy wózka w poziomie                              | $c_s$      | kNm / rad | 2÷6                     |    |    |            |    |    |
| 20   | Sztywność skrętu ramy wózka względem nadwozia w poziomie                                      | $c_{sw}$   | kNm / rad | 0÷500                   |    |    |            |    |    |

<sup>1)</sup> W stanie służbowym z pasażerami



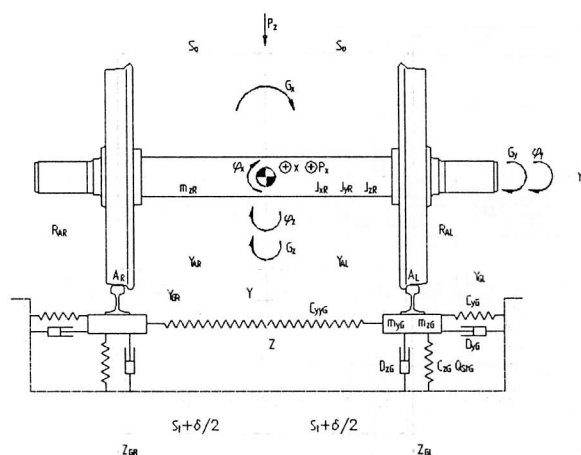
Jako najważniejsze typy autobusów szynowych, warte głębokich analiz symulacyjnych prowadzonych w celu określenia optymalnej budowy ich układów biegowych, zdaniem autorów uważa się następujące obiekty:

- jedno-, dwu- lub trójczłonowe lekkie pojazdy pasażerskie trakcyjne z wagonami opartymi na wózkach jednoosiowych,
- jedno-, dwu- lub trójczłonowe lekkie pojazdy pasażerskie trakcyjne z wagonami opartymi na wózkach dwuosiowych,
- dwu- lub trójczłonowe przegubowe lekkie pojazdy pasażerskie trakcyjne z wagonami opartymi na wózkach dwuosiowych (z zastosowaniem między wagonowych wózków Jacoba).

Na bazie wymienionych powyżej obiektów opracowano modele fizyczne i matematyczne, które szczegółowo przedstawiono wraz z topologią modeli i danych w pracy [3].

Na podstawie studiów przepisów kolejowych dotyczących dopuszczania do ruchu pojazdów szynowych takich jak karta UIC-515 [7] i UIC-518 [8] oraz raport ORE B55 Rp.8 [9] wytypowano następujące zagadnienia badawcze:

- bezpieczeństwo przed zejściem koła z szyny na łukach torowych w warunkach quasistatycznych wg [9],



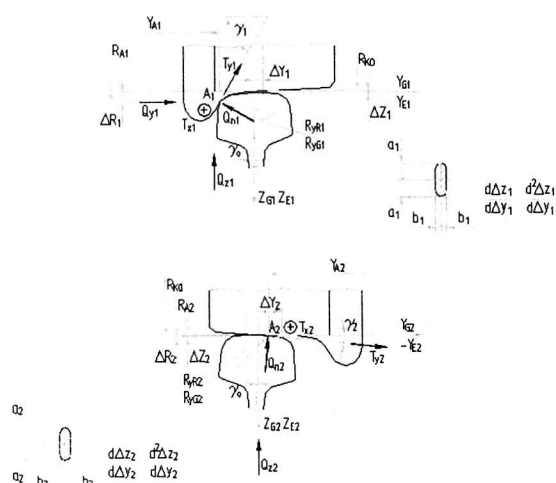
Rys. 2. Szkic zestawu kołowego wraz z torem

- stateczność biegu układów biegowych autobusu,
- oddziaływanie zestawów kołowych autobusu na tor na łukach torowych o małych i dużych promieniach,
- oddziaływanie zestawów kołowych autobusu na tor na liniach prostych przy maksymalnych prędkościach jazdy,
- spokojność jazdy autobusów na łukach torowych i liniach prostych,
- komfort pasażerów i obsługi autobusów wg np. [7].

Badania matematyczne posiadają znacznie szerszy wachlarz narzędzi niż badania doświadczalne. Symulacja komputerowa, podczas której są całkowane równania ruchu modeli matematycznych, jest odpowied-

nikiem badań doświadczalnych. Mimo, że jest ona znacznie mniej kosztowna od doświadczeń to i tak zbyt kosztowna, aby przy jej pomocy przeprowadzać kompleksowe analizy optymalizacyjne. Wykorzystywana jest głównie do określania spodziewanych właściwości pojazdu po przeprowadzonych wcześniej analizach, które wytypowały parametry optymalne.

Do szybkich i tanich metod analizy matematycznej zlinearyzowanych modeli pojazdów autorzy zaliczają analizę modalną a szczególnie analizę wartości własnych (pierwiastków). Obliczanie i rysowanie krzywych pierwiastkowych, które otrzymuje się zmieniając jeden lub kilka parametrów modelu jednocześnie jest szybkie i daje wiele informacji o zachowaniu się składników modeli (obiektu). Pomocne przy analizowaniu krzywych pierwiastkowych są wykresy kołowe przedstawiające formy („mody”) drgań, pozwalające na jednoznaczne przypisanie pierwiastka do jakiegoś elementu modelu (np. nadwozia, ramy wózka zestawu kołowego....).



Rys. 3. Szkic kontaktu koła z szyną

Szczegółowe informacje o tym, jakie analizy i z jakimi zmiennymi parametrami zostały przeprowadzone obliczenia symulacyjne lub modalne znajdują się w protokołach obliczeń sporządzanych dla każdego modelu osobno [4].

Zaprezentowane modele fizyczne i matematyczne posłużyły do ustalenia i wyboru metodyki badań, opracowania topologii modeli jak również do prowadzenia szczegółowych analiz matematycznych z różnymi układami napędowymi i biegowymi.

### 3.1. Model zestawu kołowego

Koło pojazdu szynowego ma specyficzną budowę w odróżnieniu od kół jezdnych innych pojazdów. Specyfika ta charakteryzuje się istnieniem powierzchni tocznej o profilu zapewniającym prawidłowe wężykowanie zestawów kołowych przy minimalnych naciskach kontaktowych z szyną. Najbardziej rozpowszechnionym w Europie profilem tocznym kół pojazdów pasażerskich jest profil S1002 (ERRI) – UIC 135 (UIC – PKP) [10], który przy współpracy z szyną S60 (UIC 60) [11] i szyną S49 zachowuje się opty-

malnie, utrzymując te właściwości przez dłuższy czas eksploatacji, dzięki czemu określany jest mianem profilu ustabilizowanego przy zużyciu [3].

Drugim specyficznym elementem koła pojazdu szynowego jest obrzeże, które zabezpiecza zestawy kołowe przed wyjechaniem z toru w warunkach silnego wężykowania lub na łukach torowych i rozjazdach, dzięki progresywnie narastającym siłom poprzecznym. Kąt pochylenia obrzeża, wynoszący standardowo  $70^\circ$ , zapewnia bezpieczeństwo przed wykolejeniem wszystkich prawidłowo skonstruowanych pojazdów. Koła pojazdu szynowego łączone są w pary przy pomocy osi lub wałów, tworząc zestawy kołowe. Koła mogą być z osiami połączone na sztywno, elastycznie (wkładki gumowe) lub poprzez łożyska toczne.

Dla celów symulacji komputerowej pojazdów szynowych wykorzystuje się kompleksowe modele zestawów kołowych wraz z modelem odcinka toru. Modele te uwzględniają wszystkie wspomniane wyżej cechy zestawów kołowych i szyn.

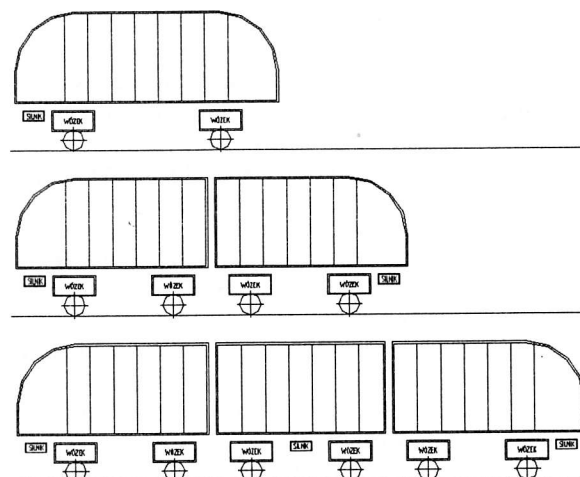
W modelach tych uwzględnienie związków geometrycznych opisujących kontakt kół z szynami (tj. funkcji profilowych) powoduje, że układ równań ruchu staje się trudny do całkowania. Niedogodność ta jest możliwa do usunięcia przez wyeliminowanie części zmiennych stanu, związanych z przemieszczeniem względnym kół i szyn.

Szkic zestawu kołowego wraz z torem przedstawiono na rys. 2., a szkic kontaktu koła z szyną na rys. 3.

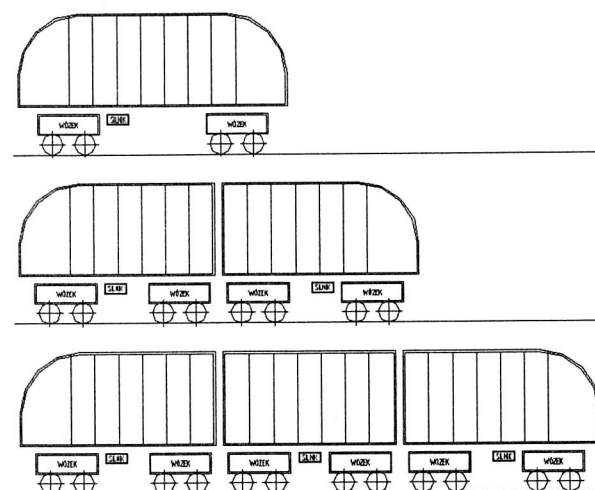
### 3.1. Wybrane modele autobusów szynowych do analiz symulacyjnych

Z wielu możliwych układów do analiz symulacyjnych wybrano ostatecznie trzy rodziny autobusów, które przedstawiono na rys. 4., 5. i 6.

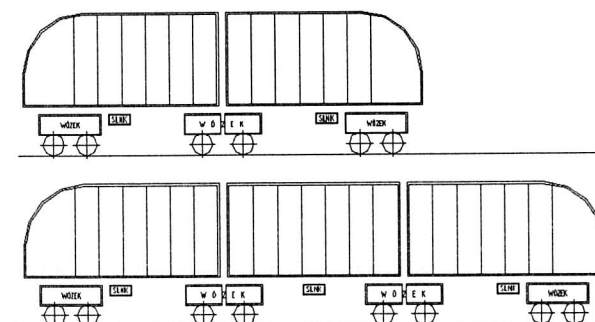
Pierwsza to rodzina autobusów zbudowanych na wózkach jednoosiowych. Ze względu na stosunkowo małą ilość zestawów kołowych, które muszą przenosić ciężar załadowanego pojazdu, charakteryzuje się zdolnością przewozu maksymalnie 80 pasażerów na człon. Na bazie tej informacji proste analizy inżynierskie wykazują, że maksymalny rozstaw podłużny zestawów kołowych nie powinien przekraczać  $9\div 10$  m w ramach jednego członu.



Rys. 4. Schemat rodziny autobusów z wózkami jednoosiowymi



Rys. 5. Schemat rodziny autobusów z wózkami dwuosioowymi



Rys. 6. Schemat rodziny autobusów z wózkami dwuosioowymi Jacob'a zabudowanymi między członami

Tabela 5

## Parametry masowe i bezwładnościowe brył sztywnych autobusu.

| Dane o bryłach autobusu szynowego jednoczynowego-dwuosioowego 1bus1 (nadwozie, rama wózka,...) |            |                                                                                    |                  |         |          |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------------|---------|----------|
| Określenie wielkości                                                                           | Symbol     | Zależności - Formuły                                                               | Jedn.            | próżny  | ładowny  |
| Przypięcie ziemskie                                                                            | g          | Zadane >>                                                                          | m/s <sup>2</sup> | 9.81    | 9.81     |
| <b>Silnik spalinowy z przekładnią główną</b>                                                   |            |                                                                                    |                  |         |          |
| <b>Gabaryty:</b>                                                                               |            |                                                                                    |                  |         |          |
| - długość                                                                                      | Ls         | Zadane >>                                                                          | m                | 2.00    | 2.00     |
| - szerokość                                                                                    | Bs         | Zadane >>                                                                          | m                | 1.40    | 1.40     |
| - wysokość                                                                                     | Hs         | Zadane >>                                                                          | m                | 0.85    | 0.85     |
| <b>Bezwładności:</b>                                                                           |            |                                                                                    |                  |         |          |
| - masa                                                                                         | m(x,y,z)   | Zadane >>                                                                          | kg               | 2900    | 2900     |
| - mom. bezw. Oxx                                                                               | Jxxs       | $(Bs^2+Hs^2) \times ms/4$                                                          | kgm <sup>2</sup> | 1499.1  | 1499.1   |
| - mom. bezw. Oyy                                                                               | Jyys       | $(Ls^2+Hs^2) \times ms/3$                                                          | kgm <sup>2</sup> | 3995.4  | 3995.4   |
| - mom. bezw. Ozz                                                                               | Jzss       | $(Bs^2+Ls^2) \times ms/3$                                                          | kgm <sup>2</sup> | 4998.7  | 4998.7   |
| <b>Położenie śr. masy:</b>                                                                     |            |                                                                                    |                  |         |          |
| <b> baza odniesienia</b>                                                                       |            |                                                                                    |                  |         |          |
| - wzdłużne                                                                                     | xs         | Środek geom. wagonu pol. na główkach szyn                                          | m                | 5.5     | 5.5      |
| - poprzeczne                                                                                   | ys         | Zadane >>                                                                          | m                | 0.0     | 0.0      |
| - pionowe pow. gr. szyn                                                                        | zs         | Zadane >>                                                                          | m                | 0.55    | 0.55     |
| Ciężar na zawieszenie                                                                          | Q0         | $ms(z)/g/2$                                                                        | N                | 24525   | 24525    |
| <b>Nadwozie</b>                                                                                |            |                                                                                    |                  |         |          |
| <b>Gabaryty:</b>                                                                               |            |                                                                                    |                  |         |          |
| - podłoga łazy wagonu                                                                          | a'         | Zadane >>                                                                          | m                | 3.80    | 3.80     |
| - długość                                                                                      | L'         | Zadane >>                                                                          | m                | 15.50   | 15.50    |
| - szerokość                                                                                    | B'         | Zadane >>                                                                          | m                | 2.90    | 2.90     |
| - wysokość                                                                                     | H'         | Zadane >>                                                                          | m                | 3.40    | 3.40     |
| <b>Bezwładności:</b>                                                                           |            |                                                                                    |                  |         |          |
| - masa                                                                                         | m'(x,y,z)  | Zadane >>                                                                          | kg               | 15300   | 22000    |
| - mom. bezw. Oxx                                                                               | Jxx'       | $0.88^2(B'^2+H'^2) \times m'/12$                                                   | kgm <sup>2</sup> | 22725.0 | 32254.9  |
| - mom. bezw. Oyy                                                                               | Jyy'       | $0.84^2(L'^2+H'^2) \times m'/12$                                                   | kgm <sup>2</sup> | 27304.0 | 387972.1 |
| - mom. bezw. Ozz                                                                               | Jzz'       | $0.86^2(B'^2+L'^2) \times m'/12$                                                   | kgm <sup>2</sup> | 27899.5 | 392892.2 |
| <b>Położenie śr. masy:</b>                                                                     |            |                                                                                    |                  |         |          |
| <b> baza odniesienia</b>                                                                       |            |                                                                                    |                  |         |          |
| - wzdłużne                                                                                     | x'         | Środek geom. wagonu pol. na główkach szyn                                          | m                | 0.0     | 0.0      |
| - poprzeczne                                                                                   | y'         | Zadane >>                                                                          | m                | 0.0     | 0.0      |
| - pionowe pow. gr. szyn                                                                        | z'         | Zadane >>                                                                          | m                | 2.00    | 2.00     |
| Ciężar na wózek przedni                                                                        | O2p        | $(0.3^2(a'+xs) + m'^2g^2(a'+x')^2)/2/a^2$                                          | N                | 107024  | 139907   |
| Ciężar na wózek tylny                                                                          | O2t        | $(0.3^2(a'-xs) + m'^2g^2(a'-x')^2)/2/a^2$                                          | N                | 99538   | 101438   |
| Ciężar na sprzężnię przed                                                                      | O21p       | $O2p/4$                                                                            | N                | 26756   | 34727    |
| Ciężar na sprzężnię tył                                                                        | O21t       | $O2t/4$                                                                            | N                | 17369   | 25360    |
| <b>Rama wózka z akcesoriami</b>                                                                |            |                                                                                    |                  |         |          |
| <b>Gabaryty:</b>                                                                               |            |                                                                                    |                  |         |          |
| - długość                                                                                      | Lrw        | Zadane >>                                                                          | m                | 1.87    | 1.87     |
| - szerokość                                                                                    | Brw        | Zadane >>                                                                          | m                | 2.20    | 2.20     |
| - wysokość                                                                                     | Hrw        | Zadane >>                                                                          | m                | 0.45    | 0.45     |
| <b>Bezwładności:</b>                                                                           |            |                                                                                    |                  |         |          |
| - masa                                                                                         | mrv(x,y,z) | Zadane >>                                                                          | kg               | 800     | 800      |
| - mom. bezw. Oxx                                                                               | Jxxrv      | $(Brw^2+Hrw^2) \times mrv/8$                                                       | kgm <sup>2</sup> | 448.2   | 448.2    |
| - mom. bezw. Oyy                                                                               | Jyyrv      | $(Lrw^2+Hrw^2) \times mrv/8$                                                       | kgm <sup>2</sup> | 341.9   | 341.9    |
| - mom. bezw. Ozz                                                                               | Jzzrv      | $(Brw^2+Lrw^2) \times mrv/10$                                                      | kgm <sup>2</sup> | 610.2   | 610.2    |
| <b>Położenie śr. masy:</b>                                                                     |            |                                                                                    |                  |         |          |
| <b> baza odniesienia</b>                                                                       |            |                                                                                    |                  |         |          |
| - wzdłużne                                                                                     | xrv        | Środek geom. wózka pol. na główkach szyn                                           | m                | 0.0     | 0.0      |
| - poprzeczne                                                                                   | yrv        | Zadane >>                                                                          | m                | 0.0     | 0.0      |
| - pionowe pow. gr. szyn                                                                        | zrv        | Zadane >>                                                                          | m                | 0.5     | 0.5      |
| Ciężar na maźnicę przed                                                                        | O1p        | $mrv(z)/g/2 + O2p/2$                                                               | N                | 57436   | 73377    |
| Ciężar na maźnicę tył                                                                          | O1t        | $mrv(z)/g/2 + O2t/2$                                                               | N                | 36702   | 54843    |
| <b>Zestaw kołowy</b>                                                                           |            |                                                                                    |                  |         |          |
| <b>Gabaryty:</b>                                                                               |            |                                                                                    |                  |         |          |
| - średnica koła                                                                                | Dzk        | Zadane >>                                                                          | m                | 0.84    | 0.84     |
| - średnica łanczy ham.                                                                         | Dlh        | Zadane >>                                                                          | m                | 0.99    | 0.99     |
| - nastaw łanczy ham.                                                                           | 2Bth       | Zadane >>                                                                          | m                | 1.50    | 1.50     |
| - długość osi                                                                                  | Bos        | Zadane >>                                                                          | m                | 2.20    | 2.20     |
| - średnica osi                                                                                 | Dos        | Zadane >>                                                                          | m                | 0.18    | 0.18     |
| - nastaw maźnic                                                                                | 2Bm        | Zadane >>                                                                          | m                | 2.00    | 2.00     |
| - nastaw łb                                                                                    | 2b0        | Zadane >>                                                                          | m                | 1.50    | 1.50     |
| <b>Bezwładności:</b>                                                                           |            |                                                                                    |                  |         |          |
| - masa                                                                                         | mk         | Zadane >>                                                                          | kg               | 290     | 290      |
| - mom. bezw. Oxxzz                                                                             | Jxxzzt     | $mk \times Dzk^2/12$                                                               | kgm <sup>2</sup> | 15.7    | 15.7     |
| - mom. bezw. Oyy                                                                               | Jyyt       | $2^2 Jxxk$                                                                         | kgm <sup>2</sup> | 31.5    | 31.5     |
| - masa                                                                                         | mos        | Zadane >>                                                                          | kg               | 340     | 340      |
| - mom. bezw. Oxxzz                                                                             | Jxxzzos    | $mos \times Bos^2/12$                                                              | kgm <sup>2</sup> | 137.1   | 137.1    |
| - mom. bezw. Oyy                                                                               | Jyyos      | $mos \times Dos^2/8$                                                               | kgm <sup>2</sup> | 1.1     | 1.1      |
| - maźnica i spr. - masa                                                                        | mmaz       | Zadane >>                                                                          | kg               | 170     | 170      |
| - łanczy ham. - masa                                                                           | mlh        | Zadane >>                                                                          | kg               | 120     | 120      |
| - mom. bezw. Oxxzz                                                                             | Jxxzzlh    | $mk \times Dzk^2/12$                                                               | kgm <sup>2</sup> | 2.8     | 2.8      |
| - mom. bezw. Oyy                                                                               | Jyyth      | $2^2 Jxxk$                                                                         | kgm <sup>2</sup> | 5.2     | 5.2      |
| - komplet - masa                                                                               | mzk        | $2mk + mos + 2mmaz$                                                                | kg               | 1500    | 1500     |
| - mom. bezw. Oxxzz                                                                             | Jxxzzzk    | $2mk^2 \times Dzk^2/12 + Jxxk + Jxxos + 2mmaz^2 \times Bm^2 + 2mth^2 \times Bth^2$ | kgm <sup>2</sup> | 999.9   | 999.9    |
| - mom. bezw. Oyy                                                                               | Jyyzk      | $2Jyyk + Jyyos + 2Jyyth$                                                           | kgm <sup>2</sup> | 74.5    | 74.5     |
| <b>Położenie śr. masy:</b>                                                                     |            |                                                                                    |                  |         |          |
| <b> baza odniesienia</b>                                                                       |            |                                                                                    |                  |         |          |
| - wzdłużne                                                                                     | xzk        | Środek geom. zestawu koł. pol. na główkach szyn                                    | m                | 0.0     | 0.0      |
| - poprzeczne                                                                                   | yzk        | Zadane >>                                                                          | m                | 0.0     | 0.0      |
| - pionowe pow. gr. szyn                                                                        | zkt        | Zadane >>                                                                          | m                | 0.42    | 0.42     |
| Ciężar koła na szynę przed                                                                     | O0p        | $Q1p + mzk^2/g/2$                                                                  | N                | 84794   | 80735    |
| Ciężar koła na szynę tył                                                                       | O0t        | $Q1t + mzk^2/g/2$                                                                  | N                | 48099   | 82001    |

Druga to rodzina autobusów zbudowanych na wózkach dwuosioowych charakteryzująca się, w porównaniu z poprzednią, możliwością przewozu do 160 pasażerów na człon. Rozstaw podłużny wózków nie powinien w nich przekraczać 18÷20 m dla jednego członu. Odgałęzieniem tej rodziny są autobusy z wózkami usytuowanymi pod przejściami międzywagonowymi (rys. 6.). Pozwala to na zmniejszenie ilości wózków, i stosuje się do przewozu mniejszej ilości pasażerów.

Przedstawione schematy autobusów to tylko „wierzchołek góry lodowej” przy definiowaniu ich modeli fizycznych. Następnym krokiem to opracowanie tabel parametrów określających masy i momenty bezwładności nadwozia, ram wózków, silników napędowych oraz zestawów kołowych. Przykładem jest tabela 5. Pozostałe są przedstawione w pracy [3].

Ponadto zostały opracowane tabele określające charakterystyki usprężynowania, prowadzenia i tłumienia tych brył. Pomocnym do tego jest program typu MS-Excel. Równoległe z tymi tabelami stworzone zostały topologie sterujące użyciem danych przez program symulacyjny oraz pliki wsadowe do seryjnych analiz komputerowych.

Konieczne było również opracowanie funkcji profilowych dla wybranej pary koło-szyna oraz sygnałów określających nierówności pionowe i poprzeczne szyn na odcinkach prostych i łukach torowych.

## 4. Wyniki analiz symulacyjnych

### 4.1. Uwagi ogólne

Głównym zadaniem analiz była optymalizacja, a więc ustalenie najkorzystniejszych parametrów autobusów szynowych. Funkcjami celu tak postawionej optymalizacji były własności ruchowe i trakcyjne układów biegowych i napędowych analizowanych wariantów.

Wiele z tych własności wymaga takich wartości parametrów konstrukcyjnych, które dają kompromis między nimi. Tak jest np. ze sztywnością prowadzenia podłużnego zestawów kołowych. Kąty nabiegania w łukach torowych wymagają dążenia do niskich sztywności, a stateczność biegu wymaga dążenia do wysokich sztywności. Wybór właściwej sztywności jest właśnie takim kompromisem.

Są również własności, których poprawa nie wymaga pogorszenia innych. W takich przypadkach określenie parametrów optymalnych jest stosunkowo proste. Niezależnie od charakteru funkcji celów z jakimi miano do czynienia, dokonano wyboru optymalnych parametrów poprzez analizę zmienności tych funkcji w zakresie parametrów dopuszczalnych.

### 4.2. Analiza i dyskusja wpływu parametrów konstrukcyjnych układów biegowych na własności ruchowe autobusów

#### 4.2.1. Autobus jednoczłonowy z wózkami jednoosiowymi

Przeprowadzona analiza wykazała, że na stabilność biegu autobusu miały wpływ następujące parametry układu biegowego i napędowego:

- sztywność podłużna prowadnika wózka względem nadwozia  $C_{XAC} \left[ \frac{kN}{mm} \right]$  przy ustalonym rozstawie

poprzecznym prowadników  $2b_{AC} = 2000mm$ ,

- sztywność poprzeczna zawieszenia nadwozi na wózku  $C_{Y2} \left[ \frac{kN}{mm} \right]$  przy ustalonych pozostałych parametrach tego zawieszenia,

- rozstaw podłużny zestawów kołowych  $2a^*$  [m] przy ustalonych pozostałych parametrach autobusu,

- moment bezwładności nadwozia  $J_z N$  [ $kgm^2$ ] względem osi pionowej „z” przy ustalonych pozostałych parametrach autobusu,

- tłumienie poprzeczne w II-gim stopniu zawieszenia

$QD \left[ \frac{kNs}{m} \right]$  przy ustalonych pozostałych parametrach autobusu,

- kąt ustawienia cięgieł prowadzenia wzdłużnego wózków względem nadwozia, między osią cięgieła i osią podłużną autobusu  $\alpha LC_{XAC}$  [rad], przy ustalonych pozostałych parametrach autobusu.

Analiza wykazała, że:

- na rys. 7. pt: „Karta stabilności ruchu – wpływ sztywności podłużnej i poprzecznej prowadzenia wózków jednoosiowych względem nadwozia na prędkości krytyczne autobusu” widać, że prędkości krytyczne autobusu wyraźnie rosną wraz ze wzrostem sztywności podłużnej  $C_{XAC}$ , natomiast mają niewielki wpływ na nią zmiany sztywności poprzecznej zawieszenia II-go stopnia  $C_{Y2}$ .

Dla osiągnięcia prędkości eksploatacyjnej rzędu:

$V = 120 \text{ km/h}$  wystarcza, aby zakres sztywności  $C_{XAC}$

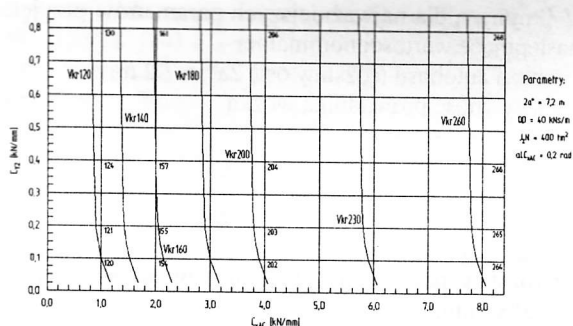
wynosił  $1,0 \div 1,5 \frac{kN}{mm}$ ,

$V = 160 \text{ km/h}$  wystarcza, aby zakres sztywności  $C_{XAC}$

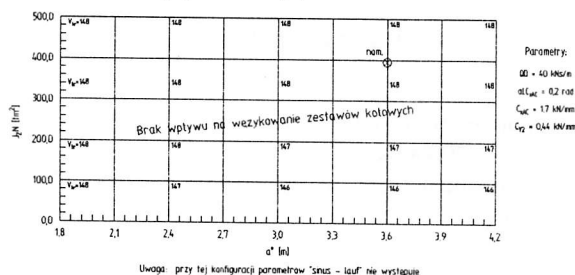
wynosił  $2,0 \div 3,0 \frac{kN}{mm}$ .

Można osiągnąć też większe prędkości eksploatacyjne, nawet rzędu 260 km/h, ale sztywności  $C_{XAC}$  muszą być wtedy bardzo wysokie,

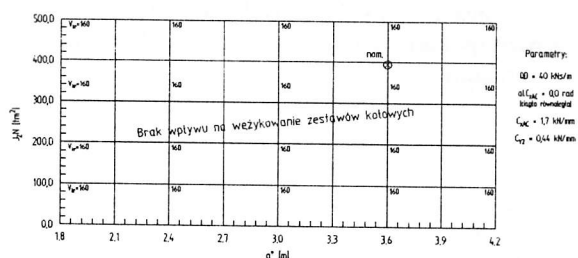
na rys. 8. pt.: „Karta stabilności ruchu – wpływ rozstawu podłużnego zestawów kołowych  $2a^*$  i momentów bezwładności nadwozia  $J_z N$  na prędkości krytyczne  $V_{kr}$ ”, w układzie współrzędnych  $a^* - J_z N$  przedstawiono wartości prędkości krytycznych autobusu. Jak widać, dla ustalonej konfiguracji parametrów, prędkość krytyczna jest prawie stała na poziomie wartości ok. 148 km/h. Świadczy to o braku wpływu bazy autobusu  $2a^*$  i momentu bezwładności nadwozia  $J_z N$  na prędkości krytyczne wężkowania zestawów kołowych. Przy innych, odległych wartościach parametrów autobusu, sytuacja może być inna, lecz w zakresie parametrów realizowanych na tego typu pojazdach takiego wpływu nie należy się spodziewać,



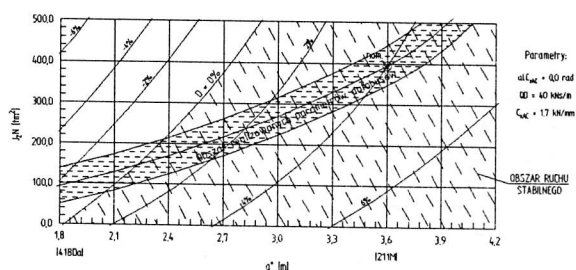
Rys. 7. Karta stabilności ruchu autobusu 1-członowego, 2-osowego. Wpływ sztywności podłużnej i poprzecznej prowadzenia wózków jednoosiowych względem nadwozia na prędkości krytyczne autobusu.



Rys. 8. Karta stabilności ruchu autobusu 1-członowego, 2-osowego. Wpływ rozstawu podłużnego zestawów kołowych  $2a^*$  i momentów bezwładności nadwozia  $J_{zN}$  na prędkości krytyczne  $V_{kr}$ .



Rys. 9. Karta stabilności ruchu autobusu 1-członowego, 2-osowego. Wpływ rozstawu podłużnego zestawów kołowych  $2a^*$  i momentów bezwładności nadwozia  $J_{zN}$  na prędkości krytyczne  $V_{kr}$ .



Rys. 10. Karta stabilności ruchu autobusu 1-członowego, 2-osowego. Wpływ rozstawu podłużnego zestawów kołowych  $2a^*$  i momentów bezwładności nadwozia  $J_{zN}$  na dekrement tłumienia  $D$  "sinus - lauf" autobusu przy prędkościach jazdy w zakresie 10-50 km/h.

- na rys. 9. pt: „Karta stabilności ruchu – wpływ rozstawu podłużnego zestawów kołowych  $2a^*$  i momentów bezwładności nadwozia  $J_{zN}$  na prędkości krytyczne  $V_{kr}$ ”, w układzie współrzędnych  $a^*$  -

$J_{zN}$  przedstawiono wartości prędkości krytycznych autobusu. Podobnie jak na rys. 8. prędkość krytyczna wężkowania zestawów kołowych ustaliła się na poziomie wartości ok. 160 km/h, tj. niewiele większym poziomie od 148 km/h, jaki jest przy poprzedniej konfiguracji parametrów. Tę niewielką poprawę prędkości krytycznej uzyskano dzięki zmianie kąta ułożenia cięgieł wózków z 0,2 rad na 0 rad,

- na rys. 10. pt: „Karta stabilności ruchu – wpływ rozstawu podłużnego zestawów kołowych  $2a^*$  i momentów bezwładności nadwozia  $J_{zN}$  na dekrement tłumienia  $D$  „sinus - lauf” autobusu przy niskich prędkościach jazdy”, w układzie współrzędnych  $a^*$  -  $J_{zN}$  przedstawiono wartości dekrementu tłumienia  $D$  drgań wężkowania wózków i nadwozia przy niskich prędkościach jazdy. Jak widać izolinia  $D = 0\%$ , która rozdziela obszar rysunku na dwa podobszary: niestabilnego ruchu i stabilnego (drgania gasnące), określa dla jakich konfiguracji  $a^*$  i  $J_{zN}$  można uzyskać ruch stabilny. Dla rzeczywistych konstrukcji autobusów dwuosioowych baza  $2a^*$  większa od ok. 5m zapewnia stabilny bieg (brak „sinus - lauf”). Na rysunku 10. przy osi  $a^*$  pokazano dwa zrealizowane pojazdy dwuosioowe (lokom. 418Da i autobus 208M), na których obserwacje i badania potwierdzają wyniki obliczeń.

Z badania czułości pierwiastków (wartości własnych) układu dynamicznego autobusu wynikają ponadto następujące wnioski, które potwierdzają wnioski wcześniejsze:

- wężkowanie zestawów kołowych w niewielkim, jednakże pozytywnym stopniu, zależy od współczynnika tłumienia poprzecznych drgań nadwozia  $QD$ ,

- kołysanie i obracanie (wężkowanie) nadwozia zależy bardzo silnie od powyższego współczynnika  $QD$ . Właściwe dekrementy tłumienia tych drgań uzyskuje się w zakresie współczynnika  $QD$

$$= 20 \div 40 \frac{kNs}{m},$$

- narastająco zmieniająca się sztywność podłużna cięgieł wózków  $C_{XAC}$  w zakresie 0÷50 kN/mm wpływa bardzo korzystnie na dekrementy tłumienia drgań wężkowania zestawów kołowych, lecz bardzo niekorzystnie na dekrementy tłumienia drgań obracania nadwozia. Dla sztywności  $C_{XAC} >$

$$10 \frac{kN}{mm} \text{ pojawiają się drgania niegasnące tzw. „sinus - lauf”,}$$

- narastająco zmieniająca się sztywność poprzeczna zawieszenia nadwozia na wózku  $C_{Y2}$  w zakresie

$$0,1 \div 1,5 \frac{kN}{mm} \text{ wpływa podobnie jak sztywność}$$

$$C_{XAC} \text{ lecz w nieco mniejszym stopniu,}$$

- wzrastający moment bezwładności nadwozia  $J_{zN}$  wpływa na obniżenie dekrementów tłumienia drgań obracania nadwozia, lecz przy dostatecznie



dużej bazie wagonu  $2a^* > 5m$  nie obniża ich aż tak, by powstały drgania „sinus-lauf”,

- wzrost bazy autobusu  $2a^*$  w zakresie  $4 \div 10$  m jest korzystny zarówno dla dekrementów tłumienia wężykowania wózków jak i dla obracania nadwozia. Na inne formy drgań prawie nie wpływa.

Wśród analiz dla autobusu dwuosowego przeprowadzono również symulacyjne badanie cykli granicznych niektórych wielkości na wózkach (np. poprzecznych sił łożyskowych  $H$ ), które wykazały, że autobus w nominalnej konfiguracji parametrów wykazuje ruch stabilny do prędkości jazdy ok. 130 km/h.

Analiza jazdy autobusu dwuosowego o parametrach nominalnych na torze prostym rzeczywistym, o dopuszczalnych błędach w ułożeniu szyn, zgodnych z kryteriami karty UIC-518 [8], pokazała, że autobus ten jakością i spokojnością biegu oraz oddziaływaniem na tor spełnia wymagania stawiane autobusom szynowym w przepisach krajowych i międzynarodowych.

Na łukach torowych w warunkach quasistatycznych autobus ten wykazuje się korzystnym wpisywaniem się, tj. małymi kątami nabiegania zestawów na kołach o promieniach większych od  $R = 400$  m, co pokazano na rys. 11.

Należy jednak pamiętać, że przy większych sztywnościach prowadników wózków niż  $1,7 \frac{kN}{mm}$  (wartość

nominalna) uzyska się autobus z większymi prędkościami (np. 160 km/h), lecz znacznie mniej przyjaznymi jego zachowaniami na łukach torowych.

Oprócz wskazanych parametrów autobusu za główny zmienny parametr do analiz stateczności przyjęto prędkość jazdy

$V$  [km/h], a dla najważniejszych parametrów przyjęto następujące wartości nominalne:

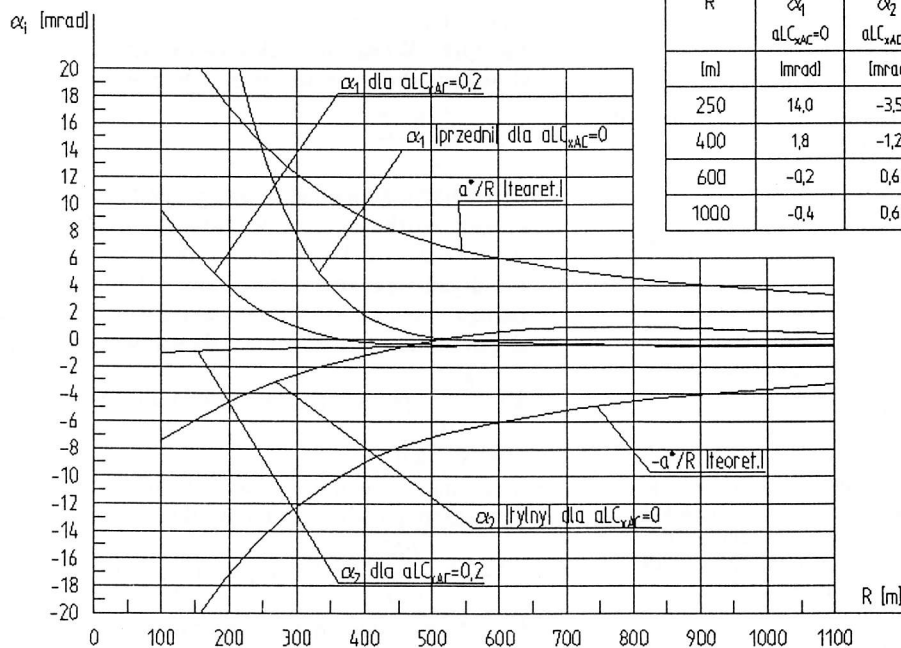
- baza autobusu (rozstaw osi)  $2a^* = 7.2$  m,
- sztywność prowadnika wózka

$$C_{XAC} = 1.7 \frac{kN}{mm},$$

- rozstaw poprzeczny prowadników wózka  $2b_{AC} = 2000$  mm,
- kąt ustawienia prowadników wózka  $aLC_{XAC} = 0.2$  rad,
- sztywność poprzeczna zawieszenia nadwozia na

$$\text{wózku } C_{Y2} = 0.44 \frac{kN}{mm},$$

- moment bezwładności nadwozia  $I_{ZN} \cong 400000 \text{ kgm}^2$ ,
- tłumienie poprzeczne nadwozia na wózku QD = 40  $\frac{kNs}{m}$ ,
- tłumienie pionowe nadwozia na wózku VD = 30  $\frac{kNs}{m}$ , przy rozstawie poprzecznym tłumików (2 szt)  $2b_{QV} = 2.36$  m,
- średnica toczna kół jezdnych  $D_K = 920$  mm,
- rozstaw kręgów tocznych kół  $2s = 1500$  mm (tor normalny).



| R    | $\alpha_1$<br>aLC <sub>XAC</sub> =0 | $\alpha_2$<br>aLC <sub>XAC</sub> =0 | $\alpha_1$<br>aLC <sub>XAC</sub> =0.2 | $\alpha_2$<br>aLC <sub>XAC</sub> =0.2 | $\alpha_{1,2}$ teoret.<br>$\pm a^*/R$ |
|------|-------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| [m]  | [mrad]                              | [mrad]                              | [mrad]                                | [mrad]                                | [mrad]                                |
| 250  | 14,0                                | -3,5                                | 2,0                                   | -0,7                                  | 14,4                                  |
| 400  | 1,8                                 | -1,2                                | -0,3                                  | -0,5                                  | 9,0                                   |
| 600  | -0,2                                | 0,6                                 | -0,4                                  | -0,4                                  | 6,0                                   |
| 1000 | -0,4                                | 0,6                                 | -0,5                                  | -0,4                                  | 3,6                                   |

Parametry:

$$a_q = 0,65 \text{ m/s}^2$$

$$2a^* = 7,2 \text{ m}$$

$$C_{XAC} = 1,7 \text{ kN/mm}$$

$$QD = 20 \text{ kNs/m}$$

$$C_{Y2} = 0,44 \text{ kN/mm}$$

Rys. 11. Realizacja kątów nabiegania zestawów kołowych autobusu dwuosowego na łukach torowych w warunkach quasistatycznych.

Ponadto do analiz przyjęto rzeczywisty profil koła UIC 135/28 [10] i szyn UIC 60 [11] o pochyleniu 1:40. Szerokość toru przyjęto 1435mm (szerokość nominalna). Przy takich założeniach ekwiwalenta stożkowatość profili kół, która w znacznym stopniu decyduje o właściwościach pojazdu szynowego, ma wartości bardzo niekorzystne.

#### 4.2.2 Autobus jednoczynowy z wózkami dwuosiowymi

Pojazd szynowy z dwoma wózkami dwuosiowymi jest najczęściej stosowanym na kolei pojazdem. Wiedza o jego zachowaniach dynamicznych jest stosunkowo duża, ale rozproszona. Przeprowadzone w pracy analizy mają za cel zebrać tę wiedzę i ewentualnie uzupełnić ją o nieznane elementy.

Parametrami zmiennymi, którymi posłużono się w analizach były:

- sztywność podłużna prowadzenia zestawu kołowego  $C_{X1} [\frac{kN}{mm}]$  w ramie wózka (na koło),
- sztywność poprzeczna prowadzenia zestawu kołowego  $C_{Y1} [\frac{kN}{mm}]$  w ramie wózka,
- sztywność poprzeczna zawieszenia nadwozia na wózku  $C_{Y2} [\frac{kN}{mm}]$  na stronę wózka,
- współczynnik tłumienia poprzecznego układu zawieszenia nadwozia na wózku  $QD [\frac{kNs}{m}]$ ,
- współczynnik tłumienia hydraulicznego tłumika wężykowania  $X2 [\frac{kNs}{mm}]$ ,
- rozstaw podłużny czopów skreću wózków  $2a^* [m]$ ,
- rozstaw podłużny zestawów kołowych wózków  $2a^+ [m]$ ,
- sztywność poprzeczna sprzężenia zestawów kołowych wózka  $C_{Ys} [\frac{kN}{mm}]$ ,
- sztywność obrotowa względem osi ze sprzężenia zestawów kołowych wózka

$$C_{fs} [\frac{kNm}{mrad}]$$

- prędkość jazdy autobusu  $V [km/h]$ .

Za nominalne wartości najważniejszych parametrów autobusu przyjęto:

- $2a^* = 18 m$  – jak w standardzie UIC,
- $2a^+ = 2 m$  – rozstaw podłużny zestawów kołowych wózka,
- Sztywności kompletu dwóch stożkowych elementów metalowo – gumowych firmy Conitech:

$$C_{X1} = 6 \frac{kN}{mm}, C_{Y1} = 4 \frac{kN}{mm}, C_{Z1} = 1 \frac{kN}{mm},$$

- Sztywności kompletu sprężyn śrubowych na stronę wózka. Sztywności na cały wózek są podwójne. Poprzeczny rozstaw sprężyn II-stopnia wynosi 2m.

$$C_{Y2} = 0,36 \frac{kN}{mm}, C_{Z2} = 0,66 \frac{kN}{mm},$$

- Stała poziomego tłumika hydraulicznego w II-gim stopniu zawieszenia

$$QD = 30 \frac{kNs}{m}$$

- Stała pionowego tłumika hydraulicznego w II-gim stopniu zawieszenia. Na wózek przypadają dwa takie tłumiki rozstawione poprzecznie w rozstawie 2,36 m.

$$VD = 25 \frac{kNs}{m}$$

- Stała hydraulicznego tłumika wężykowania wózka. Rozstaw poprzeczny tłumików na wózku wynosi 2,36 m.

$$X2 = 1000 \frac{kNs}{m}$$

Na podstawie przeprowadzonych dla tego autobusu analiz można wyciągnąć następujące wnioski:

- dekrement tłumienia drgań poprzecznych nadwozia (kołysanie i obracanie) jest proporcjonalny do wartości współczynnika  $QD$ . Dla nominalnych parametrów autobusu, właściwy zakres (15÷25%) tych dekrementów uzyskuje się dla wartości

$$QD = 30 \div 50 \frac{kNs}{m},$$

- zastosowanie hydraulicznego tłumika wężykowania ze zmiennym współczynnikiem tłumienia w zakresie

$$X2 = 10 \div 100 \frac{kNs}{m} \text{ daje znaczne korzyści w uży-$$

skaniu lepszych dekrementów tłumienia drgań wężykowania wózków, drgań wzdłużnych wózków i drgań obracania nadwozia. Dalsze wzmacnianie tłumika ( $X2$ ) powoduje pogarszanie się dekrementów tłumienia drgań wzdłużnych wózka i obracania nadwozia, i dalszą poprawę (wzrost) dekrementów tłumienia wężykowania wózków. Dla

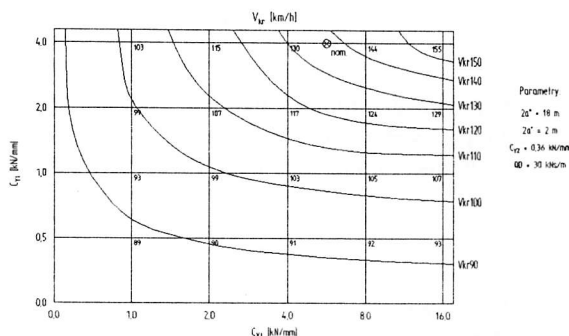
współczynników  $X2 > 500 \frac{kNs}{m}$  nawet dekremen-

ty tłumienia wężykowania zaczynają się nieznacznie pogarszać. Taki stan rzeczy jest wywołany przez niedostatek sztywności podłużnej tłumików wężykowania w stosunku do ich współczynników tłumienia, co powoduje że pracują częściowo jak sprężyny.

- wzrost sztywności poprzecznej zawieszenia nadwozia na wózkach  $C_{Y2}$  ma niewielkie znaczenie, aczkolwiek korzystne dla wężykowania wózków. Uzyskana poprawa dekrementów tłumienia wężykowania wynosi ok. 3% przy przyroście sztywno-

ści  $C_{Y2}$  w zakresie  $0,01 \div 0,85 \frac{kN}{mm}$ . Wzrost tej

sztynności ma jednak niekorzystne skutki dla drgań poprzecznych i obracania nadwozia, powodując wzrost częstotliwości tych drgań z jednoczesnym obniżeniem ich dekrementów tłumienia. Ma to bezpośrednie przełożenie na komfort jazdy. Zjawiska te są aktualne zarówno dla autobusów bez tłumików wężykowania jak i z nimi,



Rys. 12. Karta stabilności ruchu autobusu jednoczłonowego 4-osowego z wózkami dwuosiowymi bez tłumików wężykowania. Wpływ sztywności podłużnej  $C_{X1}$  i poprzecznej  $C_{Y1}$  prowadzenia zestawów kołowych na prędkości krytyczne autobusu  $V_{kr}$ .

- zwiększenie rozstawu podłużnego czopów składu wózków  $2a^*$  w zakresie 12÷20m nie ma wpływu na zmniejszenie dekrementów tłumienia wężykowania wózków,
- zwiększenie bazy wózka  $2a^+$  w zakresie 1÷4 m wpływa bardzo silnie na dekrement tłumienia jego wężykowania przy prawie niezmiennych częstotliwościach tych drgań. Dla pozostałych drgań wózka zwiększanie bazy  $2a^+$  nie ma istotnego znaczenia,
- z analiz drgań własnych i z badania amplitud cykli granicznych wynika, że skonfigurowany wg parametrów nominalnych autobus bez tłumika wężykowania może być eksploatowany do prędkości 120 km/h (powyżej biegnie niestacjonarnie), a z tłumikami wężykowania może być eksploatowany do prędkości 180 km/h. Jeżeli zamierza się te prędkości zwiększyć, należy zmienić konfigurację parametrów autobusu,
- na rys. 12. pt: „Karta stabilności ruchu autobusu jednoczłonowego 4-osowego z wózkami dwuosiowymi bez tłumików wężykowania. Wpływ sztywności podłużnej  $C_{X1}$  i poprzecznej  $C_{Y1}$  prowadzenia zestawów kołowych na prędkości krytyczne autobusu  $V_{kr}$ ”, pokazano, jak na prędkości krytyczne  $V_{kr}$  autobusu mogą wpływać sztywności  $C_{X1}$  i  $C_{Y1}$  prowadzenia zestawów kołowych w ramie wózka. Widać, że przy stosunkowo miękkim prowadzeniu ( $1 \frac{kN}{mm} / 1 \frac{kN}{mm}$ ) prędkość krytyczna wynosi tylko 95 km/h, a stosunkowo sztywnym prowadzeniu ( $16/4 \frac{kN}{mm}$ ) prawie 160km/h,
- na rys. 13. pt: „Karta stabilności ruchu autobusu jednoczłonowego 4-osowego z wózkami dwuosiowymi z tłumikami wężykowania. Wpływ sztywności podłużnej  $C_{X1}$  i poprzecznej  $C_{Y1}$  pro-

wadzenia zestawów kołowych na prędkości krytyczne autobusu  $V_{kr}$ ”.

Widać, że po zastosowaniu tłumika wężykowania, prędkości krytyczne są wyższe, ale wpływ sztywności  $C_{X1}$  i  $C_{Y1}$  jest podobny. Dla stosunkowo sztywnego prowadzenia zestawu kołowego można uzyskać prędkości krytyczne  $V_{kr}$  ok.260 km/h,

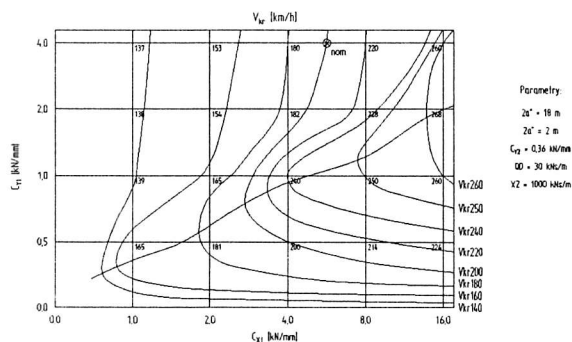
- na rys. 14.pt: „Karta stabilności ruchu autobusu jednoczłonowego z wózkami dwuosiowymi bez tłumików wężykowania ze sprzężeniem między zestawami kołowymi wózka. Wpływ sztywności obrotowej sprzężenia  $C_{Fs}$  i poprzecznej  $C_{Ys}$  na prędkości krytyczne autobusu  $V_{kr}$ ”, pokazano jak sztywności  $C_{Fs}$  i  $C_{Ys}$  sprzęgu międzyzestawowego, w układzie z niskimi sztywnościami prowadzenia zestawów kołowych  $C_{X1}$  i  $C_{Y1}$  ( $1/2 \frac{kN}{mm}$ ), wpły-

wają na wzrost prędkości krytycznych autobusu. Aby uzyskać podobne osiągi, np.  $V_{kr} = 160$  km/h trzeba zastosować stosunkowo wysokie sztywności

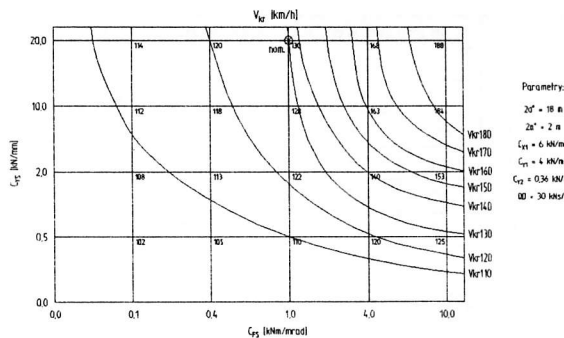
obrotowe  $C_{Fs} = 4 \frac{kNm}{mrad}$  i sztywności  $C_{Ys}$ , co nie

jest problemem, bo nie szkodzi na inne zachowania wózka, lecz zastosowanie wysokich sztywności  $C_{Fs}$  jest szkodliwe, np. dla radialnego wpisywania się zestawów kołowych w łuki torowe,

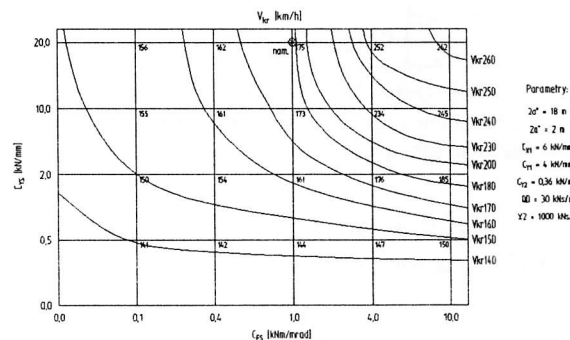
- na rys. 15. pt: „Karta stabilności ruchu autobusu jednoczłonowego z wózkami dwuosiowymi z tłumikami wężykowania ze sprzężeniem między zestawami kołowymi wózka. Wpływ sztywności obrotowej sprzężenia  $C_{Fs}$  i poprzecznej  $C_{Ys}$  na prędkości krytyczne autobusu  $V_{kr}$ ”, pokazano podobnie jak na rys. 14. jaki poziom prędkości krytycznych można uzyskać po zastosowaniu sprzęgu międzyzestawowego. Najlepsze osiągi są podobne na wózkach z tłumikami wężykowania i bez tych sprzęgów. W zastosowaniu sprzęgów międzyzestawowych widać jednak pewien pozytywny efekt, polegający na tym, że przy stosunkowo miękkim prowadzeniu zestawów kołowych w ramie wózka jest możliwe uzyskanie nieco wyższych prędkości krytycznych niż na wózkach bez tych sprzęgów, przy zachowaniu zdolności zestawów kołowych do radialnego ustawienia się na łukach torowych,



Rys. 13. Karta stabilności ruchu autobusu jednoczłonowego 4-osowego z wózkami dwuosiowymi z tłumikami wężykowania. Wpływ sztywności podłużnej  $C_{X1}$  i poprzecznej  $C_{Y1}$  prowadzenia zestawów kołowych na prędkości krytyczne autobusu  $V_{kr}$ .



Rys. 14. Karta stabilności ruchu autobusu jednocielnowego 4-osiowego z wózkami dwuosowymi bez tłumików wężykowania ze sprzężeniem między zestawami kołowymi wózka. Wpływ sztywności obrotowej sprzężenia  $C_{FS}$  i poprzecznej  $C_{VS}$  na prędkości krytyczne autobusu  $V_{kr}$ .

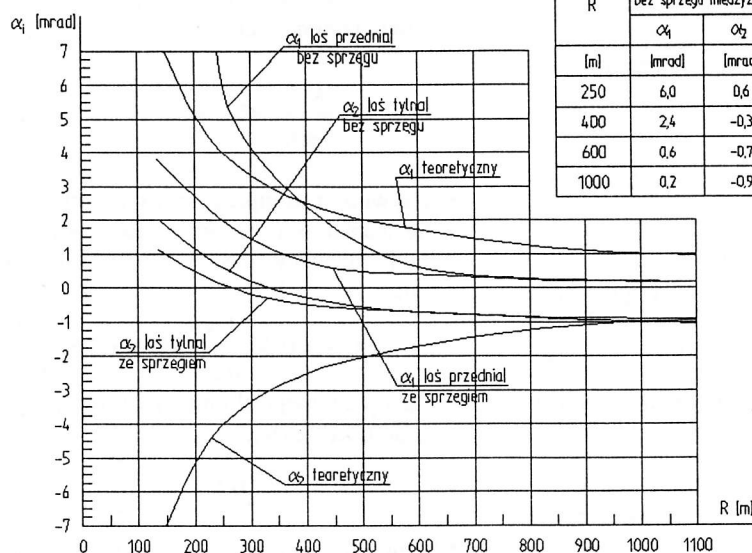


Rys. 15. Karta stabilności ruchu autobusu jednocielnowego 4-osiowego z wózkami dwuosowymi z tłumikami wężykowania ze sprzężeniem między zestawami kołowymi wózka. Wpływ sztywności obrotowej sprzężenia  $C_{FS}$  i poprzecznej  $C_{VS}$  na prędkości krytyczne autobusu  $V_{kr}$ .

- podczas jazdy autobusu nominalnie skonfigurowanego po torze prostym rzeczywistym z błędami w ułożeniu szyn, z prędkością  $V=120\text{ km/h}$  bez tłumików wężykowania stwierdzono występowanie niskiego poziomu przyspieszeń i sił oddziaływania na tor w porównaniu z wartościami dopuszczal-

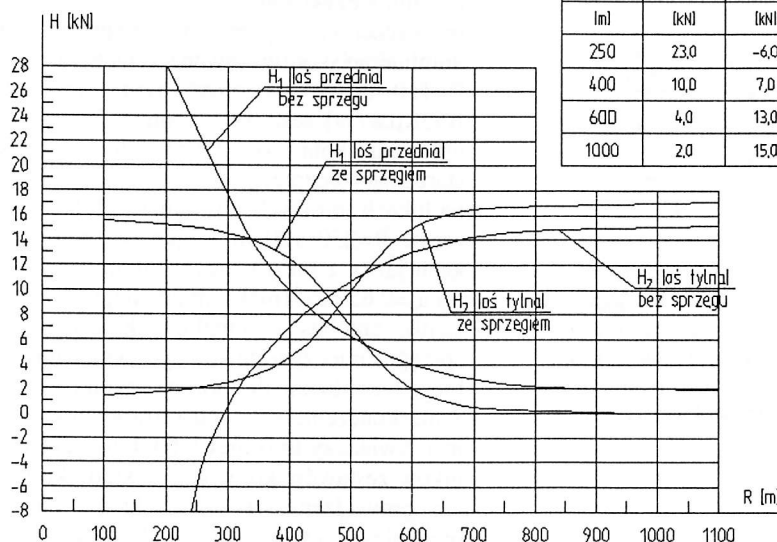
nymi wg przepisów UIC. Podobnie jest podczas jazdy z prędkością  $V=180\text{ km/h}$  autobusem z tłumikami wężykowania,

- bezpieczeństwo przed wykojeniem autobusu nominalnie skonfigurowanego na łuku o promieniu  $R=150\text{ m}$  ze zwichrowanym torem wg ORE B55Rp.8 [9] jest na poziomie  $Y/Q \approx 0,9$  przy uniesieniu koła o ok.  $3,4\text{ mm}$ . Jest to poziom wystarczająco bezpieczny,
- na łukach torowych o promieniach leżących w zakresie  $R=250\div 100\text{ m}$  w quasistatycznych warunkach jazdy z nierównoważonymi przyspieszeniami  $a_q=0,65\text{ m/s}^2$  (maksymalne dopuszczone przepięsiami), autobus nominalnie skonfigurowany bez sprzęgu międzyzestawowego wykazuje kąty nabiegania zbliżone do teoretycznych (jak dla wózka z nieskończeniem sztywno prowadzonymi zestawami). Świadczy to o niewielkich ugięciach prowadników zestawów kołowych w kierunku radialnego ich prowadzenia. Wartości kątów nabiegania przedniego zestawu wózka dla łuków o promieniach większych od  $R=300\text{ m}$ , są większe od kątów nabiegania zestawów kołowych autobusu dwuosowego w takich samych warunkach. Przewaga zalet autobusu z wózkami dwuosowymi nad wózkami jednoosiowymi występuje na łukach o promieniach  $R<300\text{ m}$ . Sumy sił  $Y$  oddziaływania zestawów kołowych na tor są znacznie poniżej sił dopuszczalnych, lecz znacznie powyżej sum sił  $Y$  na autobusie dwuosowym w tych samych warunkach, (rys. 16).
- na łukach torowych w warunkach jak wyżej, autobus z wózkami dwuosowymi ze sprzęgiem międzyzestawowym (np. typu diagonalnego) charakteryzuje się niewielkimi kątami nabiegania na tor (znacznie mniejszymi niż na wózkach bez sprzęgu) a także trochę lepszymi siłami  $Y$  w oddziaływaniu na tor w porównaniu z wózkami bez sprzęgu międzyzestawowego (rys. 17).



| R    | bez sprzęgu międzyzest. |            | ze sprzęgiem międzyzest. |            | $\alpha_{12}$ teoret.<br>$= \pm \sigma/R$ |
|------|-------------------------|------------|--------------------------|------------|-------------------------------------------|
|      | $\alpha_1$              | $\alpha_2$ | $\alpha_1$               | $\alpha_2$ |                                           |
| [m]  | [mrad]                  | [mrad]     | [mrad]                   | [mrad]     | [mrad]                                    |
| 250  | 6,0                     | 0,6        | 2,0                      | 0,1        | 4,0                                       |
| 400  | 2,4                     | -0,3       | 0,75                     | -0,5       | 2,5                                       |
| 600  | 0,6                     | -0,7       | 0,4                      | -0,7       | 1,7                                       |
| 1000 | 0,2                     | -0,9       | 0,2                      | -1,0       | 1,0                                       |

Rys. 16. Realizacja kątów nabiegania zestawów kołowych autobusu jednocielnowego z wózkami dwuosowymi na łukach torowych w warunkach quasistatycznych, z nierównoważonym przyspieszeniem  $a_q=0,65\text{ m/s}^2$ .



| R    | bez sprzęgu międzyzest. |       | ze sprzęgiem międzyzest. |       | Suma sił na wózku przednim<br>$H_1 + H_2$ |
|------|-------------------------|-------|--------------------------|-------|-------------------------------------------|
|      | $H_1$                   | $H_2$ | $H_1$                    | $H_2$ |                                           |
| lin  | [kN]                    | [kN]  | [kN]                     | [kN]  | [kN]                                      |
| 250  | 23,0                    | -6,0  | 15,0                     | 2,0   | 17,0                                      |
| 400  | 10,0                    | 7,0   | 12,5                     | 4,5   | 17,0                                      |
| 600  | 4,0                     | 13,0  | 2,0                      | 15,0  | 17,0                                      |
| 1000 | 2,0                     | 15,0  | 0,0                      | 17,0  | 17,0                                      |

Dopuszczalna wartość sił H  
dla przyjętych nacisków  
pionowych kół wynosi:  
 $H_{lim} = 50,8 \text{ kN}$

Rys. 17. Poprzeczne siły łożyskowe na zestawach kołowych autobusu jednoczłonowego z wózkami dwuosiowymi na łukach torowych w warunkach quasistatycznych, z niezerównoważonym przyspieszeniem  $a_q = 0,65 \text{ m/s}^2$ .

#### 4.2.3. Autobus dwuczłonowy przegubowy z wózkiem Jacob'a

Pojazdy tego typu są stosowane najczęściej tam, gdzie chcemy uzyskać jedną zespoloną przestrzeń dla dwóch lub więcej członów. Zaletą dodatkową jest również możliwość uzyskania opływowych kształtów wieloczłon, co ma znaczenie dla wysokich prędkości jazdy. Można również przypuszczać, że taka konfiguracja pojazdu jest ponadto korzystna dla uzyskania wysokiej stateczności jazdy.

W celu sprawdzenia tej hipotezy przeprowadzono analizy wpływu następujących parametrów układu biegowego na stateczność biegu:

- $V$  prędkość jazdy autobusu [km/h],
- $C_{X1}$  - sztywność podłużna prowadzenia zestawu kołowego w ramie wózka (na koło)  $\left[ \frac{kN}{mm} \right]$ ,
- $C_{Y1}$  - sztywność poprzeczna prowadzenia zestawu kołowego w ramie wózka  $\left[ \frac{kN}{mm} \right]$ ,
- $C_{Y2}$  - sztywność poprzeczna zawieszenia nadwozia na wózku na stronę wózka  $\left[ \frac{kN}{mm} \right]$ ,
- $Q2(QD)$  - współczynnik tłumienia poprzecznego układu zawieszenia nadwozia na wózku  $\left[ \frac{kNs}{m} \right]$ ,
- $X2$  - współczynnik tłumienia hydraulicznego tłumika wężykowania  $\left[ \frac{kNs}{m} \right]$ ,
- $C_{Ys}$  - sztywność poprzeczna sprzężenia zestawów kołowych wózka  $\left[ \frac{kN}{mm} \right]$ ,

- $C_{fs}$  - sztywność obrotowa względem osi ze sprzężenia zestawów kołowych wózka

$$\left[ \frac{kNm}{mrad} \right],$$

- $C_{Ymw}$  i  $C_{Zmw}$  - sztywność poprzeczna i pionowa przegubowego połączenia nadwozi (członów)

$$\left[ \frac{kN}{mm} \right].$$

Za nominalne wartości najważniejszych parametrów autobusu przyjęto:

- $2a^* = 18 \text{ m}$  jak w standardzie UIC,
- $2a^+ = 2 \text{ m}$  rozstaw podłużny zestawów kołowych wózka,
- $Q_0 = 63881/80701N$
- Sztywność kompletu dwóch stożkowych elementów metalowo - gumowych firmy Conitech, rozstawionych na szerokości  $2 \text{ m}$ :

$$C_{X1} = 1 \frac{kN}{mm}, \quad C_{Y1} = 2 \frac{kN}{mm}, \quad C_{Z1} = 1 \frac{kN}{mm},$$

- Sztywności kompletu sprężyn śrubowych na stronie wózka. Sztywności na cały wózek są podwójne. Poprzeczny rozstaw sprężyn II-stopnia wynosi  $2 \text{ m}$ .

$$C_{Y2} = 0,36 \frac{kN}{mm}, \quad C_{Z2} = 0,66 \frac{kN}{mm},$$

- Stała poziomego tłumika hydraulicznego w II-gim stopniu zawieszenia

$$QD = 40 \frac{kNs}{m}$$

- Stała pionowego tłumika hydraulicznego w II-gim stopniu zawieszenia. Na wózek przypadają dwa



takie tłumiki rozstawione poprzecznie na odległość 2,36 m.

$$VD = 25 \frac{kNs}{m}$$

- Stała hydraulicznego tłumika wężykowania wózka. Rozstaw poprzeczny dwóch tłumików na wózku wynosi 2,36m.

$$X_2 = 1000 \frac{kNs}{m}$$

- Sztywność poprzeczna i obrotowa sprzężenia między zestawami kołowymi.

$$C_{Ys} = 20 \frac{kN}{mm}, C_{Fs} = 0,05 \frac{kNm}{mrad},$$

- Sztywność poprzeczna i pionowa połączenia nadwozi.

$$C_{Ymw} \equiv 0 \frac{kN}{mm}, C_{Zmw} \equiv 0 \frac{kN}{mm},$$

Analizy przeprowadzone dla tak skonfigurowanego autobusu wykazały, że:

- jest możliwe uzyskanie bardzo szerokiego zakresu prędkości krytycznych autobusu 120÷300 km/h, w zależności od jego konfiguracji parametrów konstrukcyjnych. Najniższe prędkości rzędu 120 km/h występują, gdy zastosujemy sprzęgi między zestawów kołowych na łukach torowych przy jednoczesnym miękkim prowadzeniu ich w ramach wózków, umożliwiające takie ustawienia ( $C_{X1}=1 \frac{kN}{mm}$ ,

$$C_{Y1}=2 \frac{kN}{mm}, C_{Fs}=0,05 \frac{kNm}{rad}).$$

Najwyższe prędkości rzędu 300km/h występują, gdy poza wysokimi sztywnościami prowadzenia zestawów kołowych ( $C_{X1} = 30 \frac{kN}{mm}$ ,  $C_{Y1} = 20 \frac{kN}{mm}$ ) i sprzęgami

$$\text{między wózkowymi } (C_{Ys} = 20 \frac{kN}{mm}), \text{ zastosuje}$$

$$\text{się tłumiki wężykowania o dużych współczynni-}$$

$$\text{kach tłumienia rzędu } X_2 = 1000 \frac{kNs}{m}. \text{ Przy takiej}$$

konfiguracji sztywności na wózkach nie może być mowy o ich przyjaznym wpisywaniu się w łuki torowe. Z porównania wyników dla omawianego autobusu z wynikami dla jednoczłonowego autobusu z wózkami dwuosiowymi widać, że autobusy przegubowe można eksploatować z najwyższymi prędkościami przekraczającymi nawet 300 km/h.

- współczynniki tłumienia tłumików poprzecznych zawieszenia nadwozia na wózkach Q2 mają zbliżony wpływ na dekrementy drgań poprzecznych nadwozia i wężykowania wózków jak na autobusach jednoczłonowych. Współczynniki Q2 wła-

ściwe dla nominalnych parametrów autobusu wynoszą 30÷50  $\frac{kNs}{m}$  (na wózek),

- współczynniki tłumienia tłumików wężykowania wózków X2 w zakresie

$$10 \div 200 \frac{kNs}{m} \text{ wpływają bardzo korzystnie na}$$

wzrost dekrementów tłumienia drgań wózków (wężykowania, szarpania – podłużne) a także nadwozia (obracanie, galopowanie). Współczynni-

$$\text{ki X2 w zakresie } 200 \div 500 \frac{kNs}{m}, \text{ w zależności od}$$

konfiguracji parametrów wózka, powodują dalszy wzrost tych dekrementów lub ich spadek. Współ-

$$\text{czynniki } X2 > 500 \frac{kNs}{m} \text{ działają zawsze nieko-}$$

- wpływ sztywności prowadzenia zestawów kołowych  $C_{X1}$  i  $C_{Y1}$  na prędkości krytyczne autobusu przegubowego jest bardzo zbliżony do tych sztywności, jakie występują w przypadku autobusu jednoczłonowego z wózkami dwuosiowymi, tj. ze wzrostem tych sztywności prędkości rosną i to niezależnie czy wózki posiadają tłumiki wężykowania lub sprzęgi międzyzestawowe czy nie. Podobnie można skomentować wpływ sztywności sprzęgów między zestawowych  $C_{Ys}$  i  $C_{Fs}$ ,

- sztywność poprzeczna zawieszenia nadwozia na wózkach  $C_{Y2}$  w zakresie  $0,01 \div 0,85 \frac{kN}{mm}$  wpływa

identycznie jak na innych autobusach z wózkami dwuosiowymi. Wzrost tej sztywności jest bardzo niekorzystny dla drgań nadwozia (kołysanie i obracanie),

- wprowadzenie sprzęgu między członami autobusu (nad wózkiem środkowym Jacoba) o wzrastających sztywnościach poprzecznych  $C_{Ymw}$  w zakresie  $0,1 \div 4 \frac{kN}{mm}$ , powoduje wzrost częstotliwości

drgań członów przy jednoczesnym spadku ich dekrementów tłumienia. Sztywności te pociągają też zmiany w drganiach pionowych wózków, powodując wzrost ich częstotliwości. Sztywności  $C_{Ymw}$  i  $C_{Zmw}$  nie mają wpływu na wężykowanie wózków,

- wyniki w zakresie przyspieszeń na nadwoziu i siły oddziaływania na tor nie różnią się w istotny sposób od tych wielkości, uzyskanych dla autobusu jedno-członowego z wózkami dwuosiowymi.

## 5. Podsumowanie oraz wybór optymalnych konfiguracji parametrów układów biegowych autobusów

Z przeprowadzonej dyskusji wyników wyłania się dość klarowny pogląd na budowę geometryczną i charakterystyki mechaniczne układu jezdnego autobusów szynowych. W zależności od przeznaczenia

i wyboru typu autobusu, co zależy głównie od założeń ekonomicznych i użytkowych, można uszeregować autobusy i ich główne parametry na:

- autobus przeznaczony na drugorzędne linie kolejowe, eksploatowany z prędkościami do  $V_{\max} = 100 \text{ km/h}$

a) kursujący na liniach krętych, z przewagą łuków o promieniach  $R < 300 \text{ m}$  i liniach prostych:

Optimalny wybór to:

- ✓ pojazd czteroosiowy z wózkami dwuosiowymi,
- ✓ baza (rozstaw czopów skrętu) pojazdu  $2a^* = 18 \div 20 \text{ m}$  (standard),
- ✓ baza wózka w zakresie  $2a^+ = 1,5 \div 1,8 \text{ m}$ ,
- ✓ niskie wartości sztywności pionowej i poprzecznej usprężynowania II-go stopnia (sprężyny flexicoil lub sprężyny pneumatyczne ze zbiornikami dodatkowego powietrza) + elastyczne odbijaki jak w wagonach osobowych (całkowita strzałka ugięcia pionowego  $f_{\text{stat}} = 150 \div 250 \text{ mm}$ ),
- ✓ sztywności prowadzenia zestawów kołowych w ramie wózka:

- dla wózka konwencjonalnego w zakresie:

$$C_{x_1} = 3 \div 5 \frac{\text{kN}}{\text{mm}} \quad \text{podłużna,}$$

$$C_{y_1} = 2 \div 3 \frac{\text{kN}}{\text{mm}} \quad \text{poprzeczna,}$$

$$C_{z_1} = 0,8 \div 1,2 \frac{\text{kN}}{\text{mm}} \quad \text{pionowa,}$$

- dla wózka ze sprzęgiem międzystawowym

$$C_{x_1} = C_{y_1} \cong 0,5 \div 1 \frac{\text{kN}}{\text{mm}} \quad \text{podłużna i po-}$$

przezna,

$$C_{z_1} = 0,8 \div 1,2 \frac{\text{kN}}{\text{mm}} \quad \text{pionowa oraz}$$

$$C_{y_s} = 20 \div 40 \frac{\text{kN}}{\text{mm}} \quad \text{sztywność poprzeczna}$$

przegubu sprzęgu,

$$C_{F_s} = 0,8 \div 1 \frac{\text{kNm}}{\text{mrad}} \quad \text{sztywność obrotowa prze-}$$

gubu sprzęgu względem osi Z

- ✓ współczynniki tłumienia tłumików hydraulicznych:

$$\text{- pionowy II-go stopnia } VD = 20 \div 25 \frac{\text{kNs}}{\text{m}},$$

- poprzeczny II-go stopnia

$$QD = 30 \div 50 \frac{\text{kNs}}{\text{m}},$$

- wężykowania – brak,

- pionowy I-go stopnia – nie jest konieczny,

- ✓ rozstaw sprężyn i tłumików pionowych  $2 \div 2,4 \text{ m}$

b) kursujący na liniach krętych z przewagą łuków o promieniach  $R > 300 \text{ m}$  i liniach prostych:

Optimalny wybór to:

- ✓ pojazd dwuosiowy z wózkami jednoosiowymi,
- ✓ baza pojazdu w zakresie  $2a^* = 5,5 \div 8 \text{ m}$ ,
- ✓ niskie wartości sztywności pionowej i poprzecznej usprężynowania II-go stopnia + elastyczne odbijaki (całkowita strzałka ugięcia pionowego  $f_{\text{stat}} = 150 \div 250 \text{ mm}$ ),
- ✓ sztywność podłużna prowadzenia wózków

$$\text{względem nadwozia } C_{xAC} = 1,5 \div 2 \frac{\text{kN}}{\text{mm}},$$

- ✓ współczynniki tłumienia tłumików hydraulicznych:

$$\text{- pionowy II-go stopnia } VD = 15 \div 20 \frac{\text{kNs}}{\text{m}},$$

- poprzeczny II-go stopnia

$$QD = 20 \div 30 \frac{\text{kNs}}{\text{m}}$$

- ✓ rozstaw sprężyn i tłumików pionowych  $2 \div 2,4 \text{ m}$

- autobus przeznaczony na linie główne eksploatowany z prędkościami do  $V = 160 \text{ km/h}$

a) autobus dwuosiowy z wózkami jednoosiowymi:

- ✓ baza pojazdu  $2a^* > 7 \text{ m}$ ,
- ✓ sztywność II-go stopnia usprężynowania – niskie wartości sztywności pionowej i poprzecznej usprężynowania II-go stopnia (sprężyny flexicoil lub sprężyny pneumatyczne ze zbiornikami dodatkowego powietrza) + elastyczne odbijaki jak w wagonach osobowych (całkowita strzałka ugięcia pionowego  $f_{\text{stat}} = 150 \div 250 \text{ mm}$ ),
- ✓ sztywność podłużna prowadzenia wózków względem nadwozia  $C_{xAC} > 5 \frac{\text{kN}}{\text{mm}}$ ,

$$\text{dem nadwozia } C_{xAC} > 5 \frac{\text{kN}}{\text{mm}},$$

- ✓ współczynniki tłumienia tłumików hydraulicznych

$$\text{- pionowy II-go stopnia } VD = 15 \div 20 \frac{\text{kNs}}{\text{m}},$$

- poprzeczny II-go stopnia

$$QD = 20 \div 30 \frac{\text{kNs}}{\text{m}}$$

- ✓ rozstawy sprężyn i tłumików pionowych  $2 \div 2,4 \text{ m}$

b) autobus czteroosiowy lub przegubowy sześćoosiowy z wózkami dwuosiowymi konwencjonalnymi:

- ✓ baza pojazdu  $2a^* = 18 \div 20 \text{ m}$  (standard),
- ✓ sztywności II-go stopnia i tłumiki hydrauliczne – niskie wartości sztywności pionowej i poprzecznej usprężynowania II-go stopnia (sprężyny flexicoil lub sprężyny pneumatyczne ze zbiornikami dodatkowego powietrza) + elastyczne odbijaki jak w wagonach osobowych (całkowita strzałka ugięcia pionowego  $f_{\text{stat}} = 150 \div 250 \text{ mm}$ ),
- ✓ sztywności prowadzenia zestawów kołowych w

$$\text{ramie wózka } C_{x_1} = 8 \div 15 \frac{\text{kN}}{\text{mm}}, \quad C_{y_1} = 4 \div 8 \frac{\text{kN}}{\text{mm}},$$

$$C_{z_1} = 0,8 \div 1,2 \frac{\text{kN}}{\text{mm}}$$

- autobus przeznaczony na linie główne, eksploatowany z prędkościami do

$$V = 250 \text{ km/h}$$

- a) autobus czteroosiowy lub przegubowy sześcioposiowy z wózkami dwuosiowymi konwencjonalnymi:

✓ baza pojazdu  $2a^* = 18 \div 20 \text{ m}$  (standard),

✓ sztywności II-go stopnia i tłumiki hydrauliczne pionowe i poprzeczne – niskie wartości sztywności pionowej i poprzecznej usprężynowania II-go stopnia (sprężyny flexicoil lub sprężyny pneumatyczne ze zbiornikami dodatkowego powietrza) + elastyczne odbijaki jak w wagonach osobowych (całkowita strzałka ugięcia pionowego  $f_{\text{stat}} = 150 \div 250 \text{ mm}$ ),

✓ sztywności prowadzenia zestawów kołowych w

$$\text{ramie wózka } C_{x_1} = 20 \div 30 \frac{\text{kN}}{\text{mm}},$$

$$C_{y_1} = 10 \div 20 \frac{\text{kN}}{\text{mm}}, \quad C_{z_1} = 0,8 \div 1,2 \frac{\text{kN}}{\text{mm}},$$

✓ hydrauliczne tłumiki wężykowania o współczynnikach tłumienia

$$X_2 = 200 \div 500 \frac{\text{kNs}}{\text{m}} \text{ oraz sztywnej konstrukcji własnej i mocowania.}$$

#### Literatura

- [1] Marciniak Z., Sobaś J., Pawlak Z., Wierzejewski T., Kaczmarek E.: *Przegląd konstrukcji autobusów szynowych, ich układów napędowych, biegowych oraz analiza i ocena ich eksploatacji i stopnia wykorzystania dla realizacji regionalnych i lokalnych zadań przewozowych*. Projekt badawczy KBN 9T12CO4919. Praca niepublikowana IPS „TABOR” Poznań, 2000.
- [2] Marciniak Z., Sobaś J., Sienicki A., Wierzejewski T., Kaczmarek E.: *Wymagania stawiane układom napędowym i biegowym autobusów szynowych w świetle przepisów krajowych i międzynarodowych*. Projekt badawczy KBN 9T12CO4919. Praca niepublikowana IPS „TABOR” Poznań, 2001.

- [3] Marciniak Z., Sobaś J., Grzechowiak R., Pawlak Z., Sienicki A.: *Modele fizyczne i matematyczne do badań symulacyjnych ruchu autobusu z różnymi układami napędowymi i biegowymi*. Projekt badawczy KBN 9T12CO4919. Praca niepublikowana IPS „TABOR” Poznań, 2001.
- [4] Marciniak Z., Sienicki A., Grzechowiak R., Kaczmarek E.: *Badania symulacyjne układów biegowych i napędowych autobusów szynowych*. Projekt badawczy KBN 9T12CO4919. Praca niepublikowana IPS „TABOR” Poznań, 2002.
- [5] Marciniak Z., Sienicki A., Grzechowiak R.: *Optymalizacja konstrukcji i wybór podstawowych parametrów układów biegowych i napędowych na podstawie wyników badań symulacyjnych*. Projekt badawczy KBN 9T12CO4919. Praca niepublikowana IPS „TABOR” Poznań, 2002.
- [6] Marciniak Z., Sienicki A.: *Analiza pracy układu biegowego lokomotywy EP09 (104E) w aspekcie poprawy dynamiki podłużnej i trwałości układu napędowego*. Pojazdy Szynowe, nr 1/2000.
- [7] *Wagony pasażerskie. Wózki – Układy biegowe – Karta UIC 515-0*.
- [8] *Badania i homologacja pojazdów kolejowych z punktu widzenia własności dynamicznych, bezpieczeństwa jazdy, obciążenia toru i parametrów biegowych – Karta UIC 518*.
- [9] *Bezpieczeństwo przed wykolejeniem wagonów towarowych na torze zwichrowanym – warunki przejeżdżania przez wichrowaty tor – ORE B55 Rp8*.
- [10] *Tabor kolejowy. Zarys zewnętrzny obręczy i wieńców kół bezobrotowych zestawów kołowych. Zarys 28 UIC-135, PN-92/K-91056*.
- [11] *Szyny normalnotorowe. Szyna normalnotorowa UIC 60, PN-84/K-93421*.