

Mgr inż. Grażyna Barna
Ośrodek Badawczo-Rozwojowy
Pojazdów Szynowych w Poznaniu

Symulacyjna metoda doboru długości pomostów elektronicznej wagi kolejowej

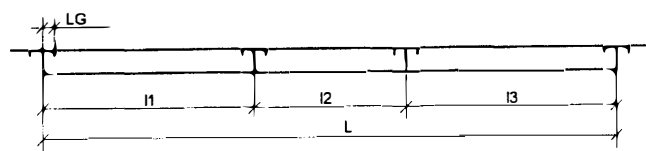
Przedmiotem artykułu jest dobór optymalnej długości pomostów dla elektronicznej wagi kolejowej o danej długości przy wykorzystaniu symulacji komputerowej. Przedstawiono założenia dotyczące długości pomostów, dane wejściowe dla symulacji oraz kryteria optymalizacyjne, a ponadto analizę położenia wagonów na pomostach. Następnie przedstawiono wyniki symulacji dla wagi o długości 18 m, analizę tych wyników i wypływające z nich wnioski. Zaproponowano optymalną długość pomostów wagi i przedstawiono rozwiązania alternatywne.

1. Wstęp

W artykule przedstawione są wyniki prac przeprowadzonych w ramach projektu celowego, dofinansowanego przez Komitet Badań Naukowych, dotyczących elektronicznej wagi kolejowej. Waga ta służy do dynamicznego pomiaru masy wagonów, znajdujących się w składzie pociągu przejeżdżającego przez wagę. Waga składa się z trzech pomostów o odpowiednio dobranych długościach tak, aby każdy wagon z dowolnego składu pociągu mógł zostać zważony. Bardzo ważnym zagadnieniem jest tu odpowiedni dobór długości pomostów wagi, bowiem przy nieodpowiednim ich dobraniu może się zdarzyć, że niektóre z wagonów nie będą mogły zostać zważone. W [4] przedstawiono analizę doboru długości i ilości pomostów wagi w sposób analityczno-wykreslny. W niniejszym artykule przedstawiono analizę procesu doboru optymalnych długości pomostów wagi przy wykorzystaniu programów symulacyjnych, umożliwiających otrzymanie wyników dotyczących parametrów przejazdu wagonu przez wagę. Długości pomostów zostały dobrane dla wagi o długości całkowitej 18 m.

2. Podstawowe pojęcia i oznaczenia

Na rys. 1 przedstawiono podstawowe wymiary związane z pomostami wagi kolejowej.

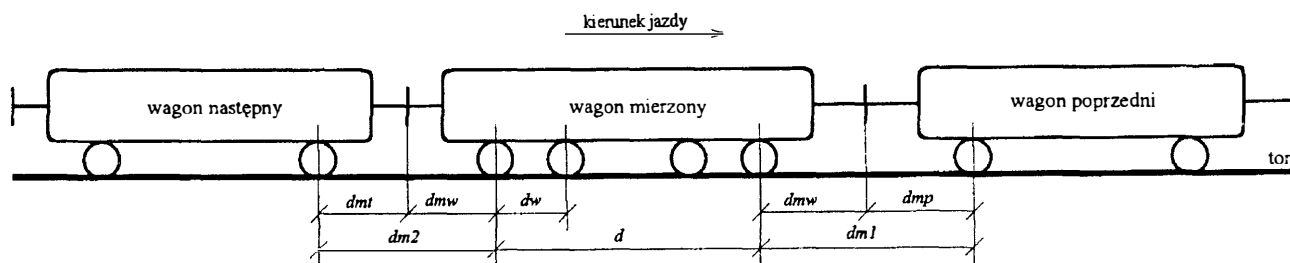


Rys. 1 Podstawowe wymiary pomostowej wagi kolejowej

Oznaczenia:

- L – całkowita długość wagi,
- LG – odległość od końca pomostu do punktu podparcia, czujnika masy i czujnika położenia
- l_1, l_2, l_3 – całkowita długość odpowiednio pierwszego, drugiego i trzeciego pomostu,

Na rys. 2 przedstawiono podstawowe wymiary, istotne dla analizy położenia ważonego wagonu.



Rys. 2 Podstawowe wymiary wagonów w składzie

Oznaczenia:

- d – rozstaw osi skrajnych wagonu (dalej nazywany długością wagonu),
- dw – rozstaw osi wózka wagonu ważonego,
- dmw – odległość osi skrajnej wagonu ważonego do zderzaka,
- dmp – odległość osi skrajnej wagonu poprzedniego do zderzaka,
- dmt – odległość osi skrajnej wagonu następnego do zderzaka,
- $dm1$ – odległość do osi skrajnej wagonu poprzedniego (dalej nazywana długością sprzęgu przedniego),
- $dm2$ – odległość do osi skrajnej wagonu następnego (dalej nazywana długością sprzęgu tylnego),

3. Sformułowanie problemu optymalizacyjnego

Dany jest zbiór $\{W\}$ składający się z n wag o długości L , i -ta waga należąca do zbioru posiada pomosty o długości $[l_{1i}, l_{2i}, l_{3i}]$. Dla każdej i -tej wagi określa się zbiór pomostów pomiarowych $\{Pi\} = \{L_{1i}; L_{2i}; L_{3i}; L_{1i} - L_{2i}; L_{2i} - L_{3i}; L_{1i} - L_{3i}\}$, gdzie L_{ji} oznacza j -ty pomost. Dany jest również zbiór wagonów, które mają być zważone. Na podstawie tego zbioru określa się zbiór możliwych długości wagonów $\{D\}$, zbiór rozstawów osi wózka $\{DW\}$ i zbiór odległości skrajnej osi wagonu do zderzaka $\{DM\}$.

Przyjmuje się, że waga ze zbioru $\{W\}$ będzie spełniać swoje zadanie, jeżeli dla każdej długości wagonu ze zbioru $\{D\}$ i dla każdej odległości skrajnej osi wagonu do zderzaka ze zbioru $\{DM\}$ oraz dla każdego rozstawu osi wózka ze zbioru $\{DW\}$, będzie istniał przynajmniej jeden pomost pomiarowy należący do zbioru $\{Pi\}$, dla którego długość okna pomiarowego lp będzie większa od przyjętej wartości minimalnej LP_{min} .

Dla każdej i -tej wagi ze zbioru $\{W\}$ definiuje się funkcję $lpwi$, która każdej czwórce: długość wagonu – długość sprzęgu przedniego – długość sprzęgu tylnego – rozstaw osi wózka, przyporządkowuje wartość największej długości okna pomiarowego, jakie można uzyskać na danej wadze (spośród sześciu możliwych okien).

Następnie określa się funkcjonal, który funkcji $lpwi$ każdej wagi przyporządkowuje jej minimalną wartość globalną. Jako optymalna zostanie przyjęta ta waga, dla której funkcjonal będzie miał największą wartość.

Przyjęcie tak sformułowanego kryterium optymalizacji gwarantuje zminimalizowanie prawdopodobieństwa, że w bazie danych wagonów znajdzie się wagon, który nie będzie mógł

zostać zważony. Z drugiej strony jednak istotna jest nie tylko globalna wartość minimalna funkcji $lpwi$ poszczególnych wag, ale również ich kształt. Istotna jest bowiem również ilość minimów funkcji oraz ich położenie. Może się przykładowo zdarzyć, że dla pewnej wagi jej funkcja $lpwi$ będzie co prawda miała wartość minimalną mniejszą od innych, ale za to jej przebieg będzie bardzo korzystny, tzn. będzie mieć niewiele minimów lokalnych i wypadać one będą dla takich połączeń wagonów, które w praktyce występować będą bardzo rzadko. Wynika z tego, że aby prawidłowo dobrać długości pomostów wagi, należałoby dla każdej wagi branej pod uwagę przeanalizować przebieg jej funkcji $lpwi$. Problem polega jednak na tym, że funkcja $lpwi$ jest funkcją czterech zmiennych i jako taka nie jest bezpośrednio postrzegana przez człowieka. W związku z tym funkcja $lpwi$ zostanie sprowadzona do funkcji jednej zmiennej d poprzez przyjęcie zastępczych, stałych wartości dw oraz dm . Wartości te zostaną przyjęte w taki sposób, aby dla danej wagi i dla danej wartości d otrzymać wartość funkcji $lpwi$ odpowiadającą najgorszemu możliwemu przypadkowi.

Wprowadzenie takich uproszczeń umożliwi, jak zostanie przedstawione w dalszej części artykułu, porównanie możliwości pomiarowych wag o różnych długościach pomostów. W oparciu o uzyskane w ten sposób wyniki zostaną przeprowadzone dalsze obliczenia, prowadzące bezpośrednio do wytypowania optymalnych długości pomostów wagi. Ze względu na przyjęcie najbardziej niekorzystnych wartości dw oraz dm zostanie przeprowadzona analiza rzeczywistych możliwości pomiarowych wagi dla przykładowej bazy wagonów [3].

4. Parametry wag, pomostów wag i pomostów pomiarowych – dane wejściowe dla symulacji

4.1. Długość wagonów d

Przyjmuje się, że ważone będą jedynie wagony dwu- i czteroosiowe [4, 5]. W [3] przedstawiona jest baza danych wszystkich spotykanych w Polsce wagonów o długościach nie przekraczających 20 m. Najmniejsza i największa długość d dla wagonów z tej bazy wynosi odpowiednio $d_{min}=4000$ mm i $d_{max}=16600$ mm. Gdyby jednak przeprowadzić obliczenia jedynie dla wagonów, znajdujących się w tej bazie, mogłoby zdarzyć się, że w przyszłości zostanie zaprojektowany wagon o długości d mieszczący się w przedziale (d_{min}, d_{max}) , dla którego jednak, przy niekorzystnych wartościach dmp i dmt okno pomiarowe będzie o wiele krótsze od okien pomiaro-

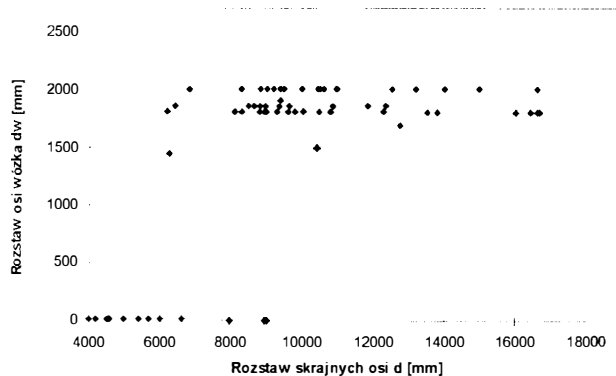
wych wszystkich innych wagonów. W skrajnym przypadku zważenie takiego wagonu może okazać się niemożliwe. Taka sama sytuacja może dotyczyć wagonów z innych krajów. Takiej ewentualności nie można wykluczyć. Jest ona teoretycznie możliwa, ponieważ baza wagonów zawiera jedynie niektóre dyskretne wartości z przedziału (d_{min} , d_{max}). Z podanych powodów obliczenia muszą zostać przeprowadzone dla całego spektrum wartości rozstawów skrajnych osi w przedziale od 4000 do 16600 mm. Krok kwantyzacji przyjęto równy 10 mm. Na rys. 3 przedstawiono długości wagonów występujących w bazie.



Rys. 3 Zestawienie długości wagonów występujących w bazie danych

4.2. Rozstaw osi wózka dw .

Na rys. 4 przedstawiono wartości rozstawów osi wózka dw wagonów czteroosiowych występujących w bazie danych w funkcji długości wagonu d .



Rys. 4. Rozstaw osi wózka w funkcji rozstawu skrajnych osi wagonów występujących w bazie danych

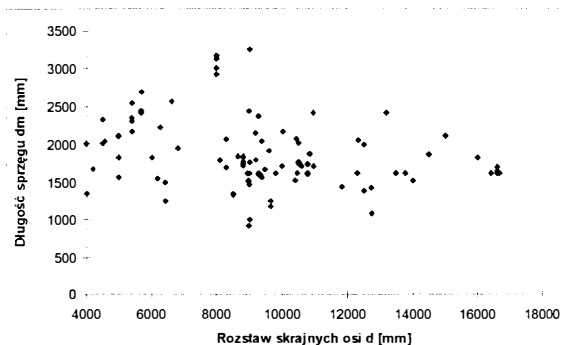
Z rys. 4 wynika, że nie można jednoznacznie uzależnić rozstawu osi wózka dw od długości wagonu d . Z drugiej strony widać, że wartości dw zmieniają się w niewielkim zakresie od 1800 mm do 2000 mm (za wyjątkiem jednego wagonu o $dw = 1450$ mm). W związku z tym do obliczeń symulacyjnych przyjęta została maksymalna wartość dw wynosząca 2000 mm, jako przypadek najbardziej niekorzystny.

4.3. Odległości osi skrajnej do zderzaka wagonów sąsiadujących $dm1$ i $dm2$

Dobór optymalnej długości pomostów wagi musi odbywać się przy założeniu najbardziej niekorzystnego, z punktu widzenia długości okna pomiarowego, przypadku. Najbardziej

niekorzystna sytuacja wystąpi dla najkrótszej możliwej odległości skrajnych osi wagonu mierzonego od skrajnych osi wagonu poprzedniego i następnego, odpowiednio $dm1$ i $dm2$ (rys. 2).

Odległości te będą zależały od długości dmw wagonu mierzonego oraz wartości dmt i dmp wagonów doczepionych po obu jego stronach. Długość dmw najwygodniej byłoby uzależnić od długości wagonu d . Na rys. 5 przedstawione są długości sprzęgów dla wszystkich długości wagonów z bazy danych. Długości sprzęgów zmieniają się w zakresie od 915 mm do 3250 mm. Z uwagi na nieregularność przyporządkowania nie jest możliwe wyprowadzenie zależności wartości dm od d .



Rys. 5. Długości sprzęgów wagonów w funkcji rozstawu skrajnych osi wagonów występujących w bazie danych

Ponieważ nie można przewidzieć, jakie wagony zostaną doczepione, należy przyjąć najgorszy możliwy przypadek, tj. najmniejszą wartość dmw oraz wartości dmp i dmt . Najmniejsza wartość długości dm wagonu występującego w bazie wynosi jedynie 915 mm (rys. 5) i istnieje tylko jeden taki wagon.

Z analizy danych z bazy wynika, że spośród 283 wagonów znajdujących się w bazie, 87% (247 wagonów) ma długość sprzęgu dmw wynoszącą co najmniej 1600 mm, a 98% (278 wagonów) ma długość sprzęgu wynoszącą co najmniej 1245 mm. W związku z tym obliczenia symulacyjne przeprowadzono dla długości sprzęgów wynoszących 1600 mm i 1245 mm (przyjęto jednocześnie że $dmw=dmp=dmt$ i oznacza się je dalej jako dm).

4.4. Długości pomostów wagi l

Waga musi umożliwiać pomiar wszystkich wagonów z bazy danych [3]. Po uwzględnieniu maksymalnej wartości rozstawu osi skrajnych wagonów występujących w bazie oraz przeciętnych wartości długości okna pomiarowego lp (punkt 7), długość całkowitą wagi L przyjęto jako równą 18 m. Obliczenia przeprowadzono dla rodziny wag o długościach pomostów zmieniających się w zakresie od $2LG$ do 18000 mm (wartość LG została przyjęta jako 260 mm dla czujnika typu CPI-01 produkcji OBR Pojazdów Szynowych, Poznań [6]).

Zmiana długości pomostów odbywa się z krokiem $\Delta l=250$ mm. Liczba możliwych wag N dla długości L wynosi:

$$N = \sum_{i=1}^K i, \quad (1)$$

gdzie:

$$K = \text{ent} \left(\frac{L - 2LG}{\Delta l} \right) + 1 \quad (2)$$

Dla $L=18000$ mm liczba możliwych wag wynosi 2485.

Zakłada się, że wagon może być ważony na każdej z możliwych kombinacji pomostów. Każdą z tych kombinacji nazywamy „pomostem pomiarowym”. W ten sposób dla wagi o pomostach oznaczonych L_1 , L_2 i L_3 uzyskujemy następujące pomosty pomiarowe:

- $P1=\{L_1\}$
- $P2=\{L_2\}$
- $P3=\{L_3\}$
- $P4=\{L_1, L_2\}$
- $P5=\{L_2, L_3\}$
- $P6=\{L_1, L_3\}$

4.5. Minimalna długość okna pomiarowego LP_{min}

Wartość najmniejszej dopuszczalnej długości okna pomiarowego LP_{min} wynika z konieczności wytłumienia drgań, powstałych na skutek wjazdu wagonu na kolejny pomost, mogących zakłócić pomiar. Wartość ta powinna zostać określona na podstawie badań lub symulacji; dla celów analizy została ona przyjęta jako 500 mm [1, 2].

5. Analiza położenia wagonu na pomostach

Celem analizy jest uzyskanie algorytmu, pozwalającego na obliczenie długości okna pomiarowego dla danego wagonu, dla każdego pomostu pomiarowego wagi o dowolnej długości całkowitej i dowolnej długości pomostów.

Pomiar masy wagonu na danym pomoście może zostać wykonany, gdy zachodzi jednoczesne spełnienie następujących warunków: wszystkie koła mierzonego wagonu znajdują się na pomoście efektywnym (części pomostu znajdującej się pomiędzy punktami podparcia) oraz żadne z kół wagonów poprzedniego i następnego nie znajduje się na pomoście. Istotne zatem są cztery wydarzenia (warunki):

1. wjazd ostatniego koła wagonu mierzonego na pomost efektywny,
2. zjazd ostatniego koła wagonu poprzedniego z pomostu (w rzeczywistości przejazd koła nad czujnikiem położenia umieszczonym w odległości LG za końcem pomostu),
3. zjazd pierwszego koła wagonu mierzonego z pomostu efektywnego,
4. wjazd pierwszego koła wagonu następnego na pomost (w rzeczywistości przejazd koła nad czujnikiem położenia umieszczonym w odległości LG przed początkiem pomostu).

Aby zostały spełnione powyższe warunki, najpierw muszą wystąpić w dowolnej kolejności wydarzenia 1 i 2, (okno pomiarowe można otworzyć, gdy wystąpi drugie z nich). Gdy następnie nastąpi pierwsze (obojętnie które) z wydarzeń 3

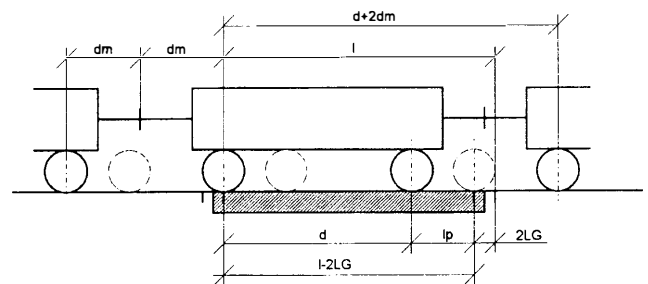
lub 4, okno pomiarowe należy zamknąć. Pomiar zatem będzie możliwy przy czterech sekwencjach zachodzenia zdarzeń: 2-1-3-4, 2-1-4-3, 1-2-3-4 oraz 1-2-4-3. Przy przyjętym założeniu $dmw=dmp=dmt$ możliwe będą jedynie dwie sekwencje zdarzeń: 2-1-3-4 (przypadek I) oraz 1-2-4-3 (przypadek IV). Analizując kolejno oba przypadki można wyprowadzić algorytm obliczania długości okna pomiarowego lp dla jednego pomostu. Na rys. 6 przedstawiono położenie kół wagonu odpowiednio dla pierwszej (przypadek I) i drugiej (przypadek IV) z podanych powyżej sekwencji. Koła narysowane linią ciągłą oznaczają położenie kół wagonu w chwili otwarcia okna pomiarowego, natomiast narysowane linią przerywaną oznaczają położenie kół wagonu w chwili zamknięcia okna pomiarowego.

Przypadek I wystąpi, jeżeli spełnione zostaną następujące dwa warunki:

$$d + 2dm > l \quad (3)$$

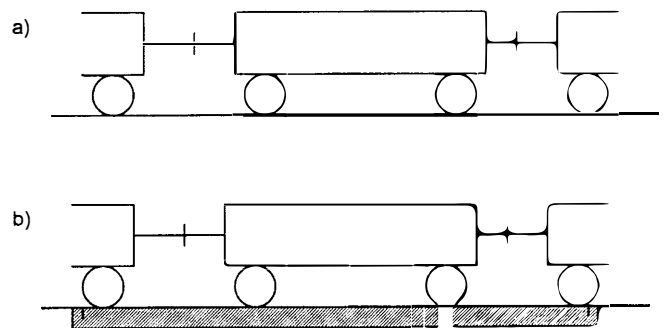
$$l - 2LG > d \quad (4)$$

co pokazano na rys. 6.



Rys. 6 Położenie kół wagonu na jednym pomoście (przypadek I)
 lp – długość okna pomiarowego

Warunek dany wzorem (3) gwarantuje, że koła ani poprzedniego ani następnego wagonu nie będą znajdować się na pomoście jednocześnie z kołami wagonu ważonego. Warunek dany wzorem (4) gwarantuje, że pomost będzie wystarczająco długi, aby wagon można było na nim zważyć. Rys. 7 ilustruje kolejno spełnienie jedynie pierwszego (7a) i jedynie drugiego (7b) warunku.



Rys. 7 Położenie kół wagonu przy spełnieniu jedynie warunku $d+2dm > l$ (a) oraz jedynie warunku $l-2LG > d$ (b)

Aby dla pomiaru na jednym pomoście wystąpił przypadek I, muszą być spełnione zależności (3) i (4). Wówczas długość okna pomiarowego wylicza się ze wzoru:

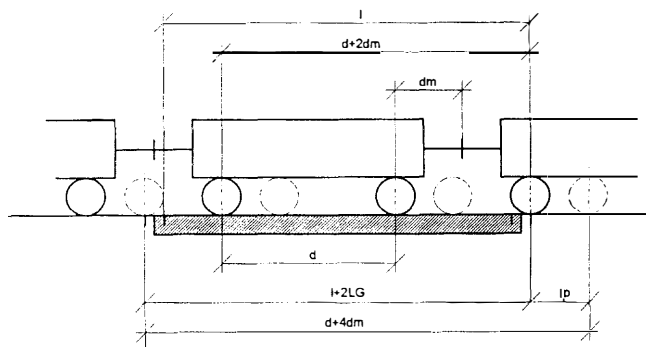
$$lp = l - d - 2LG \quad (5)$$

Przypadek IV wystąpi, jeżeli spełnione zostaną następujące dwa warunki:

$$d + 2dm < l \quad (6)$$

$$l + 2LG < d + 4dm \quad (7)$$

co pokazano na rys. 8.



Rys. 8 Położenie kół wagonu na jednym pomoście (przypadek IV)
lp – długość okna pomiarowego

Warunek dany wzorem (6) oznacza, że koła poprzedniego i następnego wagonu przez pewien czas znajdują się na pomoście jednocześnie z kołami wagonu mierzonego. Warunek dany wzorem (7) gwarantuje, że pomost będzie na tyle krótki, aby wagon można było na nim zważyć pomiędzy zjechaniem kół wagonu poprzedniego, a wjechaniem kół wagonu następnego. Aby dla pomiaru na jednym pomoście wystąpił przypadek IV, muszą być spełnione zależności (6) i (7). Wówczas długość okna pomiarowego wylicza się ze wzoru:

$$lp = 4dm + d - l - 2LG \quad (8)$$

Należy zwrócić tu uwagę na fakt, że wzory (1) do (8) prawdziwe są jedynie przy założeniu $dm1=dm2$. W przypadku, gdy $dm1 \neq dm2$, wzory przybierają inną postać, przykładowo warunek dany wzorem (3) przybierze postać dwóch wzorów:

$$d + 2dm_1 > l \quad (9)$$

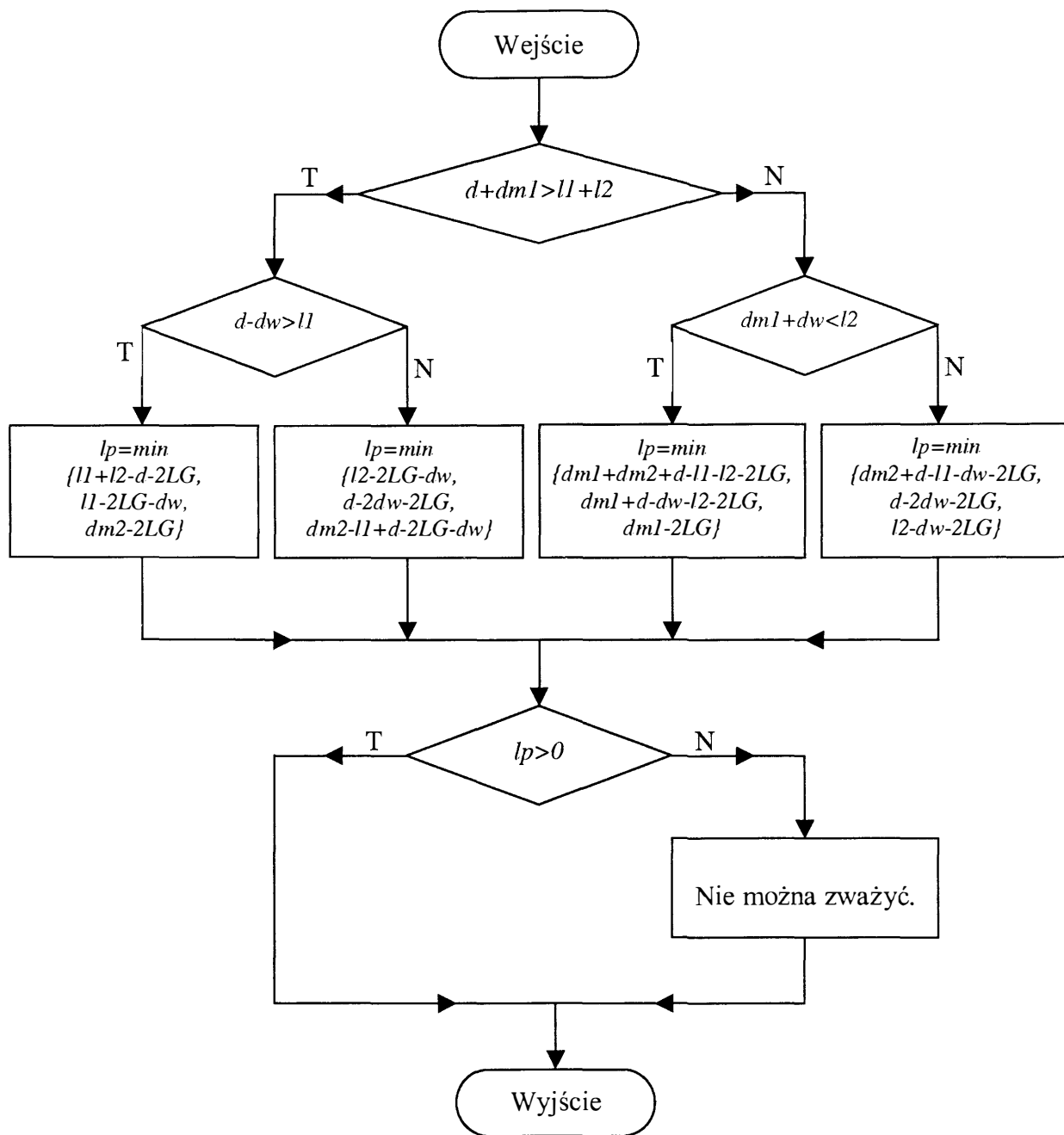
$$d + 2dm_2 > l \quad (10)$$

Jednocześnie możliwe staną się sekwencje 2-1-4-3 oraz 1-2-3-4, konieczne zatem będzie rozpatrywanie czterech przypadków. Wzory wyprowadzone przy założeniu $dm1=dm2$ zostały wykorzystane do obliczeń funkcji $lpwi$, natomiast wzory wyprowadzone przy założeniu $dm1 \neq dm2$ służą do obliczeń okien pomiarowych dla poszczególnych wagonów, co opisano w punkcie 8.

Pomiar na dwóch pomostach można w pierwszym przybliżeniu rozpatrywać jako pomiar na jednym pomoście o długości $l=l1+l2$. Możliwe są tu również dwa przypadki: I i IV. W każdym z nich, aby pomiar był możliwy, spełnione muszą być warunki wg wzorów odpowiednio (3) i (4) oraz (6) i (7). Długość okna pomiarowego określają wzory odpowiednio (5) i (8). Przy pomiarze na dwóch pomostach musi być jednak spełniony dodatkowy warunek, aby koła pierwszego wózka znajdowały się na drugim pomoście efektywnym (licząc zgodnie z kierunkiem ruchu), a koła drugiego wózka na pierwszym pomoście efektywnym. Wynika stąd dodatkowe

ograniczenie długości okna pomiarowego: okno można otworzyć nie wcześniej, niż gdy koła pierwszego wózka znajdą się na drugim pomoście efektywnym, a zamknąć nie później, niż gdy koła drugiego wózka zjadą z pierwszego pomostu efektywnego. Przypadek, gdy wszystkie koła wagonu znajdować się będą na jednym z pomostów efektywnych, sprowadza się do pomiaru na jednym pomoście i podczas obliczeń jest uwzględniany w tejże części algorytmu. Algorytm pomiaru na dwóch pomostach oparty więc jest na algorytmie pomiaru na jednym pomoście. Wszystkie warunki zawarte w algorytmie pomiaru na jednym pomoście muszą być spełnione w algorytmie pomiaru na dwóch pomostach. Dodatkowo algorytm pomiaru na dwóch pomostach zawiera sprawdzenie podanego powyżej warunku, gdzie, co wykazano dalej, konieczne jest uwzględnienie, czy wagon jest dwu czy czteroosiowy.

Pomiar na trzech pomostach rozpatruje się tak samo jak pomiar na dwóch pomostach, przy czym warunek dodatkowy tym razem sformułowany jest w ten sposób, aby koła pierwszego wózka znajdowały się na trzecim pomoście efektywnym (licząc zgodnie z kierunkiem ruchu), a koła drugiego wózka na pierwszym pomoście efektywnym. Przypadek, gdy wszystkie koła wagonu znajdować się będą na jednym z pomostów efektywnych, sprowadza się do pomiaru na jednym pomoście i podczas obliczeń jest uwzględniany w tejże części algorytmu. Przypadek, gdy wszystkie koła pierwszego wózka znajdować się będą na trzecim pomoście efektywnym, a wszystkie koła drugiego wózka na drugim lub gdy wszystkie koła pierwszego wózka znajdować się będą na drugim pomoście efektywnym, a wszystkie koła drugiego wózka na pierwszym, sprowadza się do pomiaru na dwóch pomostach i podczas obliczeń jest uwzględniany w tejże części algorytmu. W analogiczny sposób rozpatruje się pomiar na czterech i więcej pomostach. Na rys. 9 przedstawiono algorytm obliczania długości okna pomiarowego dla pomostu pomiarowego będącego kombinacją dwóch pomostów wagi. W przypadku przyjęcia założenia $dm1=dm2$, należy w podanym algorytmie w miejsce wyrażenia „dm1” oraz „dm2” podstawić wyrażenie „2dm”.



Rys. 9 Algorytm obliczania długości okna pomiarowego dla pomostu pomiarowego będącego kombinacją dwóch pomostów wagi (T – „tak”, N – „nie”)

6. Programy symulacyjne

W oparciu o opisany algorytm, został napisany w języku TurboPascal 7.0 pakiet programów *POMOSTY*. Pakiet ten składa się z kilku programów, umożliwiających przeprowadzenie podanych poniżej analiz dla wagi o zadanej długości. Danymi wejściowymi do programów są: długość całkowita wagi L , minimalna i maksymalna długość pomostów wagi, minimalna i maksymalna długość wagonów, krok kwantyzacji długości wagi i długości wagonów, odległość od końca pomostu do czujnika masy – LG oraz wartości dm i dw . W

oparciu o założenia przedstawione w pkt 3, pakiet umożliwia przeprowadzenie podanych poniżej obliczeń:

- Dla rodziny wag o dwóch pomostach jednakowej długości wygenerowane zostają dane, umożliwiające utworzenie dla każdej wagi wykresów długości minimalnego okna pomiarowego w funkcji długości wagonów. Dzięki tym wykresom można wyciągnąć ogólne wnioski dotyczące możliwości pomiarowych wagi.
- Dane do wykresu opisanego powyżej utworzone zostają dla jednej wagi o podanej długości pomostów.
- Dla danej wagi i dla danego wagonu obliczone zostają

długości okna pomiarowego na poszczególnych pomostach pomiarowych.

- Spośród wszystkich wag z rodziny, wybrana zostaje waga o długości optymalnej według kryterium równomierności przyrostu długości pomostów pomiarowych (kryterium opisane bliżej w pkt 7.2.).
- Spośród wszystkich wag z rodziny, spełniających dodatkowy warunek, wybrana zostaje waga o optymalnej długości. Przykładowy dodatkowy warunek, to ograniczenie długości pomostów.

7. Obliczenia i analiza wyników

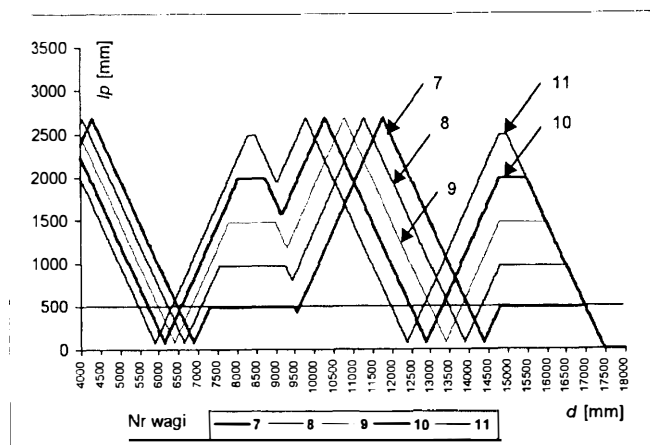
7.1. Obliczenia w oparciu o podstawowe kryterium optymalizacyjne.

7.1.1. Obliczenia.

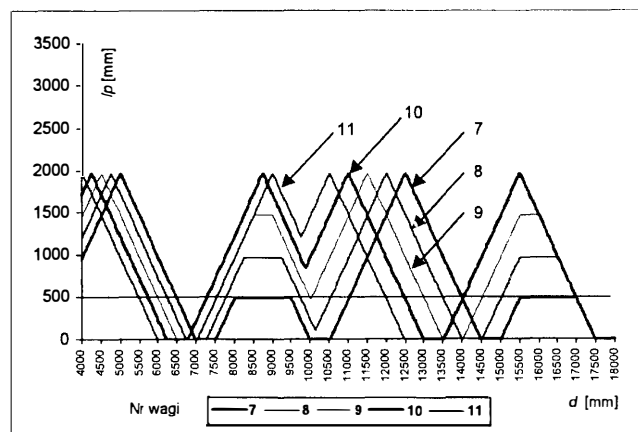
Zgodnie z rozważaniami przedstawionymi w punkcie 3, podstawowym kryterium oceny jakości wag jest globalna wartość minimalna ich funkcji lp_{wi} oraz, w przypadku wag o zbliżonych tych wartościach, kształt funkcji, tzn. ilość i wartość minimów lokalnych. Ze względu na dużą ilość wag w rodzinie (punkt 4.4.) zostało wprowadzone uproszczenie polegające na tym, że dwa pomosty wagi są równej długości. Obliczenia przeprowadzone zostały dla siedmiu rodzin wag o długościach całkowitych L wynoszących od 18 m do 22 m, zmieniających się co 0.5 m oraz dla wartości dm wynoszących 1600 mm i 1245 mm (pkt. 4.3). Celem tak przyjętych założeń jest uzyskanie możliwie dużej ilości wyników otrzymanych z obliczeń przeprowadzonych przy przyjęciu różnych danych wejściowych. Po przeprowadzeniu analizy tych wyników można wyciągnąć pierwsze wnioski dotyczące wpływu długości pomostów na jakość wagi. Wyniki obliczeń przedstawiono w tabeli 1.

7.1.2. Analiza wyników i wnioski.

Na rys. 10 i 11 przedstawiono przykładowe wykresy funkcji lp_{wi} dla kilku wag o długości całkowitej 18 m, odpowiednio dla wartości dm wynoszącej 1600 mm i 1245 mm. Numery wag przyjęto według tabeli 1.



Rys. 10 Wykresy długości okna pomiarowego lp dla $L=18$ m i $dm=1600$ mm w funkcji rozstawu skrajnych osi wagonu d dla pięciu przykładowych wag



Rys. 11 Wykresy długości okna pomiarowego lp dla $L=18$ m i $dm=1245$ mm w funkcji rozstawu skrajnych osi wagonu d dla pięciu przykładowych wag

Z rys. 10 i 11 widać, że w niektórych przypadkach otrzymana długość okna pomiarowego lp jest mniejsza od przyjętego LP_{min} , a dla wartości dm wynoszącej 1245 mm niektórych wagonów wręcz nie można zważyć. Należy jednak pamiętać, że dla celów symulacji zostały przyjęte dane wejściowe bardzo „niekorzystne” z punktu widzenia długości okna pomiarowego. Celem bowiem jest uzyskanie wagi o jak najlepszych ogólnych zdolnościach ważenia wagonów, tzn. niezależnych od przyjętej bazy wagonów. W dalszej kolejności należy przeanalizować możliwości ważenia wagonów z ustalonej bazy. Jednak waga dobrana w opisany powyżej sposób gwarantuje największe prawdopodobieństwo, że dowolny „obcy” wagon, tzn. wagon spoza danej bazy, będzie również mógł być na niej zważony.

Z analizy przebiegu wszystkich wykresów wynika, że najlepsze wyniki zostały otrzymane w sytuacji, gdy jeden z pomostów wagi ma długość 4.5 m. A więc dla wagi o długości całkowitej L wynoszącej 18 m, przy założeniu równości dwóch pomostów, optymalna waga ma pomosty o długościach wynoszących 4.5, 6.75 i 6.75 m.

Otrzymany wynik jest zgodny z przewidywaniem. Aby bowiem każdemu z wagonów znajdujących się w przedziale $d_{min} \div d_{max}$ zapewnić możliwie najlepsze warunki pomiaru, przyrosty długości ciągu kolejnych pomostów pomiarowych (uszeregowanych według długości) powinny być równomierne. Warunek ten zostanie spełniony dla wagi o pomostach o długościach wynoszących kolejno 3, 9 i 6 m. Z drugiej strony, ponieważ pomost pomiarowy otrzymany ze złożenia dwóch pomostów wagi nie jest równoważny jednemu pomostowi o długości równej sumie tych dwóch pomostów – okno pomiarowe zostanie zamknięte po dojechaniu przednich kół wagonu do końca pierwszego pomostu – długość najkrótszego pomostu powinna być jak najdłuższa. Z pierwszej obserwacji wynika, że długość najkrótszego pomostu powinna wynosić około 3 m, z drugiej, że nie może ona być zbyt mała. Zatem długość najkrótszego pomostu równą 4.5 m, otrzymaną w wyniku symulacji, można uznać za wiarygodną. Na podstawie przeprowadzonych obliczeń przyjmuje się więc, że długość najkrótszego pomostu wynosi 4.5 m.

Zestawienie wag spełniających podstawowe kryterium optymalizacyjne

☐ lub ☐ dm=1600 mm, ☐ dm=1245 mm

Tabela 1

	18 m			18,5 m			19 m			19,5 m			20 m			20,5 m			21 m			21,5 m			22 m		
	I1	I2	I3	I1	I2	I3	I1	I2	I3	I1	I2	I3	I1	I2	I3	I1	I2	I3	I1	I2	I3	I1	I2	I3	I1	I2	I3
1	0	9	9	0	9,25	9,25	0	9,5	9,5	0	9,75	9,75	0	10	10	0	10,25	10,25	0	10,5	10,5	0	10,75	10,75	0	11	11
2	0,5	8,75	8,75	0,5	9	9	0,5	9,25	9,25	0,5	9,5	9,5	0,5	9,75	9,75	0,5	10	10	0,5	10,25	10,25	0,5	10,5	10,5	0,5	10,75	10,75
3	1	8,5	8,5	1	8,75	8,75	1	9	9	1	9,25	9,25	1	9,5	9,5	1	9,75	9,75	1	10	10	1	10,25	10,25	1	10,5	10,5
4	1,5	8,25	8,25	1,5	8,5	8,5	1,5	8,75	8,75	1,5	9	9	1,5	9,25	9,25	1,5	9,5	9,5	1,5	9,75	9,75	1,5	10	10	1,5	10,25	10,25
5	2	8	8	2	8,25	8,25	2	8,5	8,5	2	8,75	8,75	2	9	9	2	9,25	9,25	2	9,5	9,5	2	9,75	9,75	2	10	10
6	2,5	7,75	7,75	2,5	8	8	2,5	8,25	8,25	2,5	8,5	8,5	2,5	8,75	8,75	2,5	9	9	2,5	9,25	9,25	2,5	9,5	9,5	2,5	9,75	9,75
7	3	7,5	7,5	3	7,75	7,75	3	8	8	3	8,25	8,25	3	8,5	8,5	3	8,75	8,75	3	9	9	3	9,25	9,25	3	9,5	9,5
8	3,5	7,25	7,25	3,5	7,5	7,5	3,5	7,75	7,75	3,5	8	8	3,5	8,25	8,25	3,5	8,5	8,5	3,5	8,75	8,75	3,5	9	9	3,5	9,25	9,25
9	4	7	7	4	7,25	7,25	4	7,5	7,5	4	7,75	7,75	4	8	8	4	8,25	8,25	4	8,5	8,5	4	8,75	8,75	4	9	9
10	4,5	6,75	6,75	4,5	7	7	4,5	7,25	7,25	4,5	7,5	7,5	4,5	7,75	7,75	4,5	8	8	4,5	8,25	8,25	4,5	8,5	8,5	4,5	8,75	8,75
11	5	6,5	6,5	5	6,75	6,75	5	7	7	5	7,25	7,25	5	7,5	7,5	5	7,75	7,75	5	8	8	5	8,25	8,25	5	8,5	8,5
12	5,5	6,25	6,25	5,5	6,5	6,5	5,5	6,75	6,75	5,5	7	7	5,5	7,25	7,25	5,5	7,5	7,5	5,5	7,75	7,75	5,5	8	8	5,5	8,25	8,25
13	6	6	6	6	6,25	6,25	6	6,5	6,5	6	6,75	6,75	6	7	7	6	7,25	7,25	6	7,5	7,5	6	7,75	7,75	6	8	8
14	6,5	5,75	5,75	6,5	6	6	6,5	6,25	6,25	6,5	6,5	6,5	6,5	6,75	6,75	6,5	7	7	6,5	7,25	7,25	6,5	7,5	7,5	6,5	7,75	7,75
15	7	5,5	5,5	7	5,75	5,75	7	6	6	7	6,25	6,25	7	6,5	6,5	7	6,75	6,75	7	7	7	7	7,25	7,25	7	7,5	7,5
16	7,5	5,25	5,25	7,5	5,5	5,5	7,5	5,75	5,75	7,5	6	6	7,5	6,25	6,25	7,5	6,5	6,5	7,5	6,75	6,75	7,5	7	7	7,5	7,25	7,25
17	8	5	5	8	5,25	5,25	8	5,5	5,5	8	5,75	5,75	8	6	6	8	6,25	6,25	8	6,5	6,5	8	6,75	6,75	8	7	7
18	8,5	4,75	4,75	8,5	5	5	8,5	5,25	5,25	8,5	5,5	5,5	8,5	5,75	5,75	8,5	6	6	8,5	6,25	6,25	8,5	6,5	6,5	8,5	6,75	6,75
19	9	4,5	4,5	9	4,75	4,75	9	5	5	9	5,25	5,25	9	5,5	5,5	9	5,75	5,75	9	6	6	9	6,25	6,25	9	6,5	6,5
20	9,5	4,25	4,25	9,5	4,5	4,5	9,5	4,75	4,75	9,5	5	5	9,5	5,25	5,25	9,5	5,5	5,5	9,5	5,75	5,75	9,5	6	6	9,5	6,25	6,25
21	10	4	4	10	4,25	4,25	10	4,5	4,5	10	4,75	4,75	10	5	5	10	5,25	5,25	10	5,5	5,5	10	5,75	5,75	10	6	6
22	10,5	3,75	3,75	10,5	4	4	10,5	4,25	4,25	10,5	4,5	4,5	10,5	4,75	4,75	10,5	5	5	10,5	5,25	5,25	10,5	5,5	5,5	10,5	5,75	5,75
23	11	3,5	3,5	11	3,75	3,75	11	4	4	11	4,25	4,25	11	4,5	4,5	11	4,75	4,75	11	5	5	11	5,25	5,25	11	5,5	5,5
24	11,5	3,25	3,25	11,5	3,5	3,5	11,5	3,75	3,75	11,5	4	4	11,5	4,25	4,25	11,5	4,5	4,5	11,5	4,75	4,75	11,5	5	5	11,5	5,25	5,25
25	12	3	3	12	3,25	3,25	12	3,5	3,5	12	3,75	3,75	12	4	4	12	4,25	4,25	12	4,5	4,5	12	4,75	4,75	12	5	5
26	12,5	2,75	2,75	12,5	3	3	12,5	3,25	3,25	12,5	3,5	3,5	12,5	3,75	3,75	12,5	4	4	12,5	4,25	4,25	12,5	4,5	4,5	12,5	4,75	4,75
27	13	2,5	2,5	13	2,75	2,75	13	3	3	13	3,25	3,25	13	3,5	3,5	13	3,75	3,75	13	4	4	13	4,25	4,25	13	4,5	4,5
28	13,5	2,25	2,25	13,5	2,5	2,5	13,5	2,75	2,75	13,5	3	3	13,5	3,25	3,25	13,5	3,5	3,5	13,5	3,75	3,75	13,5	4	4	13,5	4,25	4,25
29	14	2	2	14	2,25	2,25	14	2,5	2,5	14	2,75	2,75	14	3	3	14	3,25	3,25	14	3,5	3,5	14	3,75	3,75	14	4	4
30	14,5	1,75	1,75	14,5	2	2	14,5	2,25	2,25	14,5	2,5	2,5	14,5	2,75	2,75	14,5	3	3	14,5	3,25	3,25	14,5	3,5	3,5	14,5	3,75	3,75
31	15	1,5	1,5	15	1,75	1,75	15	2	2	15	2,25	2,25	15	2,5	2,5	15	2,75	2,75	15	3	3	15	3,25	3,25	15	3,5	3,5
32	15,5	1,25	1,25	15,5	1,5	1,5	15,5	1,75	1,75	15,5	2	2	15,5	2,25	2,25	15,5	2,5	2,5	15,5	2,75	2,75	15,5	3	3	15,5	3,25	3,25
33	16	1	1	16	1,25	1,25	16	1,5	1,5	16	1,75	1,75	16	2	2	16	2,25	2,25	16	2,5	2,5	16	2,75	2,75	16	3	3
34	16,5	0,75	0,75	16,5	1	1	16,5	1,25	1,25	16,5	1,5	1,5	16,5	1,75	1,75	16,5	2	2	16,5	2,25	2,25	16,5	2,5	2,5	16,5	2,75	2,75
35	17	0,5	0,5	17	0,75	0,75	17	1	1	17	1,25	1,25	17	1,5	1,5	17	1,75	1,75	17	2	2	17	2,25	2,25	17	2,5	2,5
36	17,5	0,25	0,25	17,5	0,5	0,5	17,5	0,75	0,75	17,5	1	1	17,5	1,25	1,25	17,5	1,5	1,5	17,5	1,75	1,75	17,5	2	2	17,5	2,25	2,25
37	18	0	0	18	0,25	0,25	18	0,5	0,5	18	0,75	0,75	18	1	1	18	1,25	1,25	18	1,5	1,5	18	1,75	1,75	18	2	2
38				18,5	0	0	18,5	0,25	0,25	18,5	0,5	0,5	18,5	0,75	0,75	18,5	1	1	18,5	1,25	1,25	18,5	1,5	1,5	18,5	1,75	1,75
39							19	0	0	19	0,25	0,25	19	0,5	0,5	19	0,75	0,75	19	1	1	19	1,25	1,25	19	1,5	1,5
40										19,5	0	0	19,5	0,25	0,25	19,5	0,5	0,5	19,5	0,75	0,75	19,5	1	1	19,5	1,25	1,25
42													20	0	0	20	0,25	0,25	20	0,5	0,5	20	0,75	0,75	20	1	1
43																20,5	0	0	20,5	0,25	0,25	20,5	0,5	0,5	20,5	0,75	0,75
44																			21	0	0	21	0,25	0,25	21	0,5	0,5
45																						21,5	0	0	21,5	0,25	0,25
46																									22	0	0

Tabela zawiera zestawienie długości pomostów dla dziewięciu wag o długości całkowitej od 18 m do 22 m, o dwóch pomostach jednakowej długości, przy kroku zmiany dł. pierwszego pomostu wynoszącym 0,5 m. Wszystkie długości pomostów w tabeli podane są w metrach.

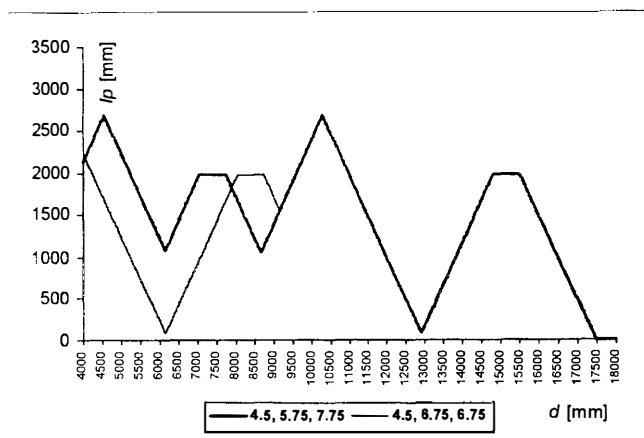
Wagi spełniające podstawowe kryterium optymalizacyjne oznaczono jak według legendy.

7.2. Kryterium równomierności przyrostu długości pomostów pomiarowych

Przeprowadzono obliczenia mające na celu wyłonienie z rodziny wag o długości pierwszego pomostu wynoszącej 4.5 m, wagi optymalnej według kryterium równomierności przyrostu długości pomostów pomiarowych (opisanego w poprzednim punkcie). Zostało tam stwierdzone, że „przyrosty długości ciągu kolejnych pomostów pomiarowych (uszerzgowanych według długości) powinny być równomierne”. W tym celu został wykorzystany kolejny program pakietu wg [1], przy pomocy którego zostały przeprowadzone obliczenia pomostów według powyżej sformułowanego kryterium. Jeżeli przez $d_1...d_5$ oznaczmy wartości różnic długości pomostów pomiarowych uporządkowane rosnąco, to funkcję kryterialną możemy zdefiniować jako:

$$Q = \sum_{i=1}^5 (d_i - \bar{d})^2 \quad (11)$$

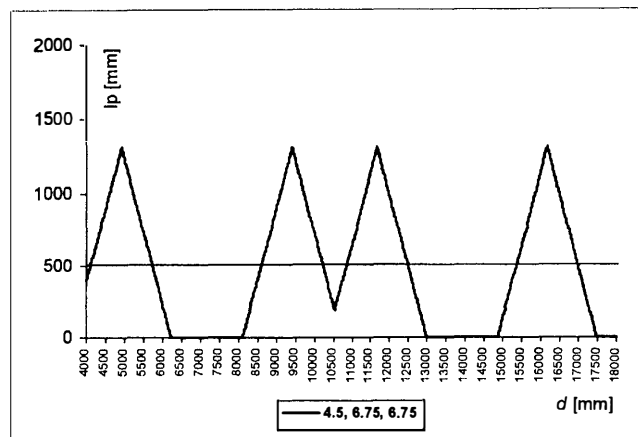
Po przeprowadzeniu obliczeń jako optymalną uzyskuje się wagę o długości pomostów 3, 9 i 6 m. Ponieważ jednak długość najkrótszego pomostu powinna wynosić 4.5 m, obliczenia zostały przeprowadzone ponownie, tym razem dla warunku, że długości pomostów nie mogą być krótsze niż 4.5 m. W wyniku obliczeń otrzymano wagę o długościach pomostów wynoszących kolejno 4.5, 5.75 i 7.75 m. Na rys. 12 przedstawiono dla porównania wykresy funkcji lp_{wi} dla wag o długościach 4.5, 5.75 i 7.75 m oraz 4.5, 6.75 i 6.75 m dla $dm=1600$ mm.



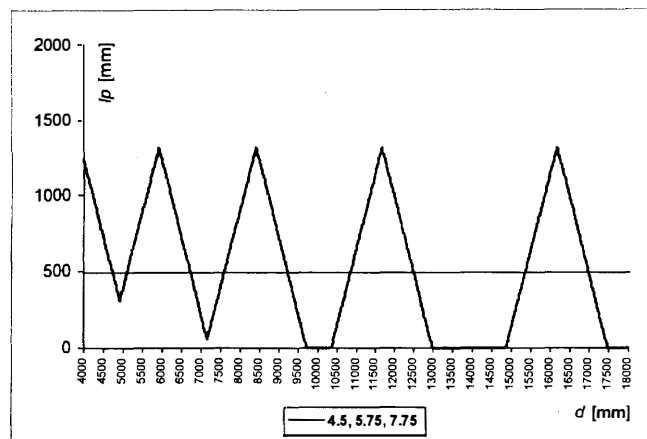
Rys. 12 Wykresy długości okna pomiarowego lp dla wag o długościach pomostów 4.5, 5.75 i 7.75 m oraz 4.5, 6.75 i 6.75 m, dla $dm=1600$ mm w funkcji rozstawu skrajnych osi wagonu d

8. Sprawdzenie możliwości ważenia wagonów z bazy danych

W kolejnym kroku dokonano obliczeń możliwości ważenia na wagach o długościach pomostów 4.5, 5.75 i 7.75 m oraz 4.5, 6.75 i 6.75 m wagonów faktycznie występujących w bazie danych [3, 7]. W tym celu przeprowadzono obliczenia długości okien pomiarowych przy założeniu $dw=2000$ mm i $dm=915$ mm. Otrzymane wyniki przedstawiono odpowiednio na rys. 13 i 14.



Rys. 13 Wykresy długości okna pomiarowego lp dla $L=18$ m i $dm=915$ mm dla wag o długościach pomostów 4.5, 6.75 i 6.75 m w funkcji rozstawu skrajnych osi wagonu d



Rys. 14 Wykresy długości okna pomiarowego lp dla $L=18$ m i $dm=915$ mm dla wag o długościach pomostów 4.5, 5.75 i 7.75 m w funkcji rozstawu skrajnych osi wagonu d

Dla obydwu wag otrzymano po cztery przedziały długości wagonów, dla których długość okna pomiarowego jest mniejsza od $LP_{min}=500$ mm. Ponieważ do symulacji przyjęto najgorsze możliwe dane wejściowe, więc jeżeli w bazie danych będą istniały wagony, których nie będzie można zważyć przy pewnej kombinacji połączeń z innymi wagonami (o krótkich sprzęgach), to znajdują się one jedynie w wymienionych czterech przedziałach.

Dla wagi o długościach pomostów 4.5, 6.75 i 6.75 m w bazie danych występuje 89 wagonów, których długości zawierają się w przedziałach, dla których długość okna pomiarowego jest mniejsza od $LP_{min}=500$ mm. Spośród nich 72 wagony mają takie długości sprzęgów, że będą mogły zostać zważone przy dowolnej kombinacji połączeń. Z pozostałych siedemnastu wagonów siedem zostanie zważonych w sytuacji, gdy będą połączone z większością wagonów z bazy, natomiast dla pozostałych dziesięciu wagonów liczba wagonów, z którymi połączenie nie zapewnia możliwości zważenia jest następująca: jeden z tych wagonów nie będzie mógł zostać zważony w sytuacji gdy po przynajmniej jednej stronie zostanie dołączony jeden z ośmiu wagonów o najkrótszych sprzęgach, dwa wagony nie będą mogły zostać zważone w połączeniu z dwoma wagonami, a siedem pozostałych nie zostanie zważonych tylko w połączeniu z jednym wagonem.

Dla wagi o długościach pomostów 4.5, 5.75 i 7.75 m w bazie danych występuje 98 wagonów, których długości zawierają się w przedziałach, dla których długość okna pomiarowego jest mniejsza od $LP_{min}=500$ mm. Spośród nich 80 ma takie długości sprzęgów, że będą mogły zostać zważone przy dowolnej kombinacji połączeń.

Dla pozostałych osiemnastu liczba wagonów, z którymi połączenie nie zapewnia możliwości zważenia jest następująca: jeden z tych wagonów nie będzie mógł zostać zważony w sytuacji gdy po przynajmniej jednej stronie zostanie dołączony jeden z pięciu wagonów o najkrótszych sprzęgach, jeden wagon nie będzie mógł zostać zważony w połączeniu z czterema wagonami, dziewięć wagonów nie będzie mogło zostać zważonych w połączeniu z trzema wagonami, a siedem pozostałych nie zostanie zważonych tylko w połączeniu z jednym wagonem.

Po wyeliminowaniu wagonu typu 902 R, o długości do zde rzaka 915 mm, pozostanie jedynie jedenaście wagonów, które nie będą mogły zostać zważone przy połączeniu z niektórymi nielicznymi wagonami z bazy.

Z przeprowadzonej analizy wynika, że dla bazy wagonów towarowych PKP obie wagi zapewniają bardzo dobre warunki ważenia wagonów, przy czym lepsze warunki ważenia zapewnia waga o długościach pomostów 4.5, 5.75 i 7.75 m.

9. Podsumowanie

Przedstawiono sposób doboru długości pomostów elektronicznej wagi kolejowej o długości całkowitej 18 m i składającej się z trzech pomostów, przy wykorzystaniu programów symulacyjnych. Założono, że waga powinna zapewniać jak najlepsze warunki ważenia dla wagonu o dowolnych wymiarach, zawierających się w określonych przedziałach. W wyniku przeprowadzonych obliczeń, jako optymalna wyznaczona została waga o długościach pomostów wynoszących 4.5, 5.75 i 7.75 m. W dalszej kolejności dokonano sprawdzenia możliwości pomiaru rzeczywistych wagonów z bazy danych wagonów towarowych PKP i otrzymano zadowalające rezultaty. Identyczne obliczenia przeprowadzono

dla wagi o długościach pomostów 4.5, 6.75 i 6.75 m, która została wybrana jako optymalna spośród trójpomostowych wag o długości całkowitej 18 m oraz o dwóch pomostach równej długości. Jeżeli pewne pogorszenie możliwości ważenia jest w danej sytuacji do przyjęcia, a ze względów mechanicznych korzystne będzie zastosowanie wagi o dwóch pomostach tej samej długości, można wybrać tę właśnie wagę. W zależności od sytuacji można też modyfikować otrzymane długości pomostów. Jeżeli na przykład w określonych zastosowaniach niektóre wagony będą ważone częściej niż inne, można, nieznacznie modyfikując długości pomostów wagi, zwiększyć długość okna pomiarowego dla tych właśnie wagonów.

Literatura:

- [1] Barna G: *Założenia elektronicznej wagi kolejowej. Podsystem sterowania procesem ważenia. Część II—analiza długości okna pomiarowego. Opracowanie OBRPS Poznań, 1995.*
- [2] Barna G. *Analiza procesu doboru optymalnych długości pomostów dla elektronicznej wagi kolejowej. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej nr 32, Materiały konferencyjne „Pojazdy Szynowe 98”.*
- [3] Bejenka K: *Założenia elektronicznej wagi kolejowej. Podsystem sterowania procesem ważenia. Część I—zestawienie wagonów i lokomotyw. Opracowanie OBRPS Poznań, 1995.*
- [4] Durzyński Z., *Dobór liczby i długości pomostów w kolejowej wadze typu dynamicznego, „Pojazdy Szynowe Nr 1/1998”.*
- [5] Frączek J., Sypka M., Barna G. *Elektroniczna waga kolejowa. Podsystem sterowania procesem ważenia. Materiały konferencyjne Pojazdy Szynowe 96.*
- [6] Iwanowski J. *Przytorowy czujnik indukcyjny CPI-01 Opracowanie OBRPS Poznań, 1995.*
- [7] *Katalog pojazdów szynowych; części 1÷3. Ośrodek Badańczo-Rozwojowy Pojazdów Szynowych. Poznań 1996.*