

Tom 4 Prace analityczne

Część 2 Obliczanie wielkości stanu na podstawie danych elementarnych

Diagnostyka Stanu Nawierzchni - DSN

Historia dokumentu

Nazwa dokumentu	Tom 4 Prace analityczne, Część 2 Obliczanie wielkości stanu na podstawie danych elementarnych, Diagnostyka Stanu Nawierzchni - DSN
Nazwa pliku	tom4_czesc2_obliczanie_wielkosci_stanu_120615
Data utworzenia	20 lutego 2012
Data ostatniej modyfikacji	5 lipca 2012

Wersja	Data zmiany	Opis zmian	Autor
1.0	15.06.2012		IBDiM

Spis treści

1	Cel dokumentu	5
1.1	Dokumenty związane z niniejszym dokumentem	5
1.2	Załączniki do niniejszego dokumentu	6
2	Wprowadzenie	7
3	Projekcja geograficznych danych elementarnych na model sieci.....	8
3.1	Ogólny opis procedury.....	8
3.2	Dane wejściowe procedury.....	8
3.3	Dane wyjściowe procedury.....	9
3.4	Przebieg procedury rzutowania	11
3.4.1	Zmodyfikowany algorytm Dijkstra	11
3.4.2	Współczynnik dopasowania kształtu (WDK).....	14
3.4.3	Rzut prostopadły	15
3.4.4	Zlokalizowanie punktów pomiarowych na modelu sieci	16
3.4.5	Rozdzielenie pomiędzy odcinki diagnostyczne.....	17
3.4.6	Utworzenie sieciowych danych elementarnych.....	19
4	Procedury obliczania wielkości stanu	20
4.1	Równość podłużna.....	20
4.1.1	IRI – międzynarodowy wskaźnik równości	20
4.1.2	AUN – gęstość spektralna nierówności.....	20
4.1.3	LWI – wskaźnik oddziaływania nierówności	28
4.1.4	PGR_AVG i PGR_MAX – symulacja planografu	38
4.2	Równość poprzeczna	39
4.2.1	GK – Średnia głębokość koleiny.....	39
4.2.2	GW – Średnia teoretyczna głębokość wody w koleinie	39
4.2.3	PP – Pochylenie poprzeczne	40
4.3	Współczynnik tarcia	41
4.4	Makrotekstura	41
4.5	Cechy powierzchniowe	41
4.5.1	Ustalenie rodzaju nawierzchni	41
4.5.2	Parametry nawierzchni bitumicznych	41
4.5.3	Parametry nawierzchni betonowych	42

4.6 Ugięcia 42

1 Cel dokumentu

W dokumencie opisano proces obliczania wielkości stanu w ramach systemu Diagnostyki Stanu Nawierzchni (DSN), włączając opisy poszczególnych wielkości stanu, procedur obliczających te wielkości i sposób ich zapisu w danych wynikowych DSN.

W ramach niniejszego dokumentu podany został także opis procedury projekcji geograficznych danych elementarnych na sieć drogową (przeliczenie współrzędnych geograficznych na lokalizację w systemie referencyjnym). Poprzedza on proces obliczania wielkości stanu.

W rozdziale 2 podano ogólne założenia procesu obliczania i zapisywania wielkości stanu.

W rozdziale 3 przedstawiona została procedura projekcji geograficznych danych elementarnych na model sieci.

W rozdziale 4 opisane zostały w podziale na poszczególne podprojekty procedury obliczania wielkości stanu.

1.1 Dokumenty związane z niniejszym dokumentem

Dokument	Opis
[T1/cz2]	Tom 1: Organizacja i standardy kampanii diagnostyki stanu technicznego nawierzchni / Część 2: Cechy nawierzchni podlegające identyfikacji i ocenie
[T1/cz3]	Tom 1: Organizacja i standardy kampanii diagnostyki stanu technicznego nawierzchni / Część 3: Wymagania jakościowe
[T2/cz2]	Tom 2: Formaty danych / Część 2: Dane podstawowe opisujące sieć drogową
[T2/cz3]	Tom 2: Formaty danych / Część 3: Dane elementarne o stanie nawierzchni
[T2/cz4]	Tom 2: Formaty danych / Część 4: Dane wynikowe
[T4/cz3]	Tom 4: Prace analityczne / Część 3: Ocena stanu, tzn. obliczanie wartości stanu oraz wartości wskaźników zespolonych
[DOK1]	E1926 – 08 Standard Practice for Computing International Roughness Index of Roads from Longitudinal Profile Measurements, ASTM 2008
[DOK2]	ISO 8608:1995(E) – Mechanical vibration – Road surface profiles – Reporting of measured data, ISO 1995
[DOK3]	ISO 2631-1:1997 – Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 1: General requirements, ISO 2010

Dokument	Opis
[DOK4]	VDI guideline 2057 Part 1 – Human exposure to mechanical vibrations – Whole-body vibration, VDI 2007

1.2 Załączniki do niniejszego dokumentu

Do niniejszego dokumentu nie przewidziano załączników.

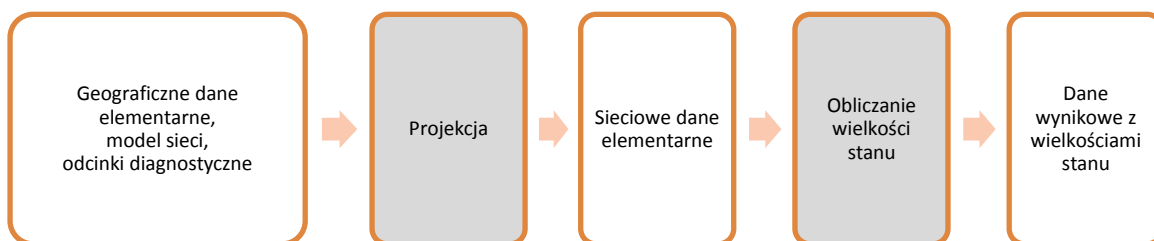
2 Wprowadzenie

Obliczanie wielkości stanu następuje w ramach realizacji podprojektu PP-P (Wyznaczanie wielkości parametrów stanu). Wykonywane jest ono na podstawie **sieciowych** danych elementarnych. Dane elementarne przyporządkowane są do odpowiednich odcinków diagnostycznych. Obliczanie wielkości stanu odbywa się niezależnie dla danych z poszczególnych odcinków diagnostycznych. Wyjątek stanowią niektóre procedury obliczania wielkości stanu dla równości podłużnej. Wykorzystują one dane zidentyfikowane na fragmentach nawierzchni sąsiadujących z danym odcinkiem diagnostycznym¹. Jest to podyktowane uwarunkowaniami obliczeniowymi wykorzystanych algorytmów.

W ramach podprojektu PP-P jest także realizowana projekcja geograficznych danych elementarnych na sieć drogową, w wyniku czego powstają sieciowe dane elementarne². Projekcja polega na przypisaniu danych elementarnych przyporządkowanych do współrzędnych geograficznych do lokalizacji na modelu sieci (do odcinków diagnostycznych).

Obliczone wielkości stanu zapisywane są w pliku z danymi wynikowymi DSN ([T2/cz4]) i służą do obliczenia wartości stanu w ramach podprojektu PP-O (Ocena stanu). Etap oceny stanu opisany jest w [T4/cz3].

Przebieg procesu projekcji i obliczania wielkości stanu przedstawiony jest na poniższym schemacie:



Rysunek 1: Schemat przebiegu procesu projekcji geograficznych danych elementarnych na sieć i obliczania wielkości stanu

¹ Zależnie od położenia danego odcinka diagnostycznego, dane te są zapisane w sieciowych danych elementarnych w tzw. danych rozbiegowych i pobiegowych lub w sąsiednich odcinkach diagnostycznych.

² Projekcja danych elementarnych na sieć jest często określana skrótowo jako „projekcja”

3 Projektcja geograficznych danych elementarnych na model sieci

3.1 Ogólny opis procedury

Podczas wykonania procedury projekcji elementarne wyniki identyfikacji zakodowane w plikach z geograficznymi danymi elementarnymi, uporządkowane wedle przejazdów pomiarowych i zlokalizowane przy pomocy położenia geograficznego przypisywane są do modelu sieci. Następuje reorganizacja danych, w wyniku której, geograficzne lokalizacje stają się informacją poboczną, dane zaś są uporządkowane wedle odcinków diagnostycznych umiejscowionych w ramach odcinków referencyjnych modelu sieci.

Projekcja wykonywana jest w identyczny sposób dla danych elementarnych wszystkich podprojektów (PP-Nx, PP-Ny, PP-T, PP-M, PP-I, PP-U, PP-F). Jest to związane z faktem, że podstawową jednostką danych, funkcjonującą podczas projekcji dla wszystkich podprojektów identyfikacji danych jest metrowy rekord danych elementarnych [T2/cz3].

Projekcja jest wykonywana niezależnie dla różnych podprojektów.

Podczas projekcji wykonywane są dodatkowe czynności związane z agregacją pewnych danych do odcinków diagnostycznych, np. prędkości pomiarowe (z wyłączeniem PP-T).

3.2 Dane wejściowe procedury

Dane wejściowe procedury projekcji obejmują:

- pliki z geograficznymi danymi elementarnymi, zawierającymi wyniki pomiarów, przypisane do punktów, identyfikowanych poprzez współrzędne geograficzne (co 10 metrów³) oraz metr bieżący pomiaru. Geograficzne dane elementarne zgodne z [T2/cz3], zawierają dane pomiarowe wykonane zgodnie z [T1/cz2] i [T1/cz3],
- plik z danymi podstawowymi określający geometrię modelu sieci zgodny z [T2/cz2],
- plik wynikowy określający podział na odcinki diagnostyczne zgodny z [T2/cz4].

³ Z wyjątkiem PP-F, gdzie co 5 metrów

3.3 Dane wyjściowe procedury

Procedura projekcji zwraca pliki z sieciowymi danymi elementarnymi. Są to pliki zawierające dane elementarne zlokalizowane przez położenie na modelu sieci, tzn. przez określenie ciągu danych pomiarowych (sekwencji metrowych rekordów) jako obiektu liniowego w myśl definicji danych podstawowych o sieci.

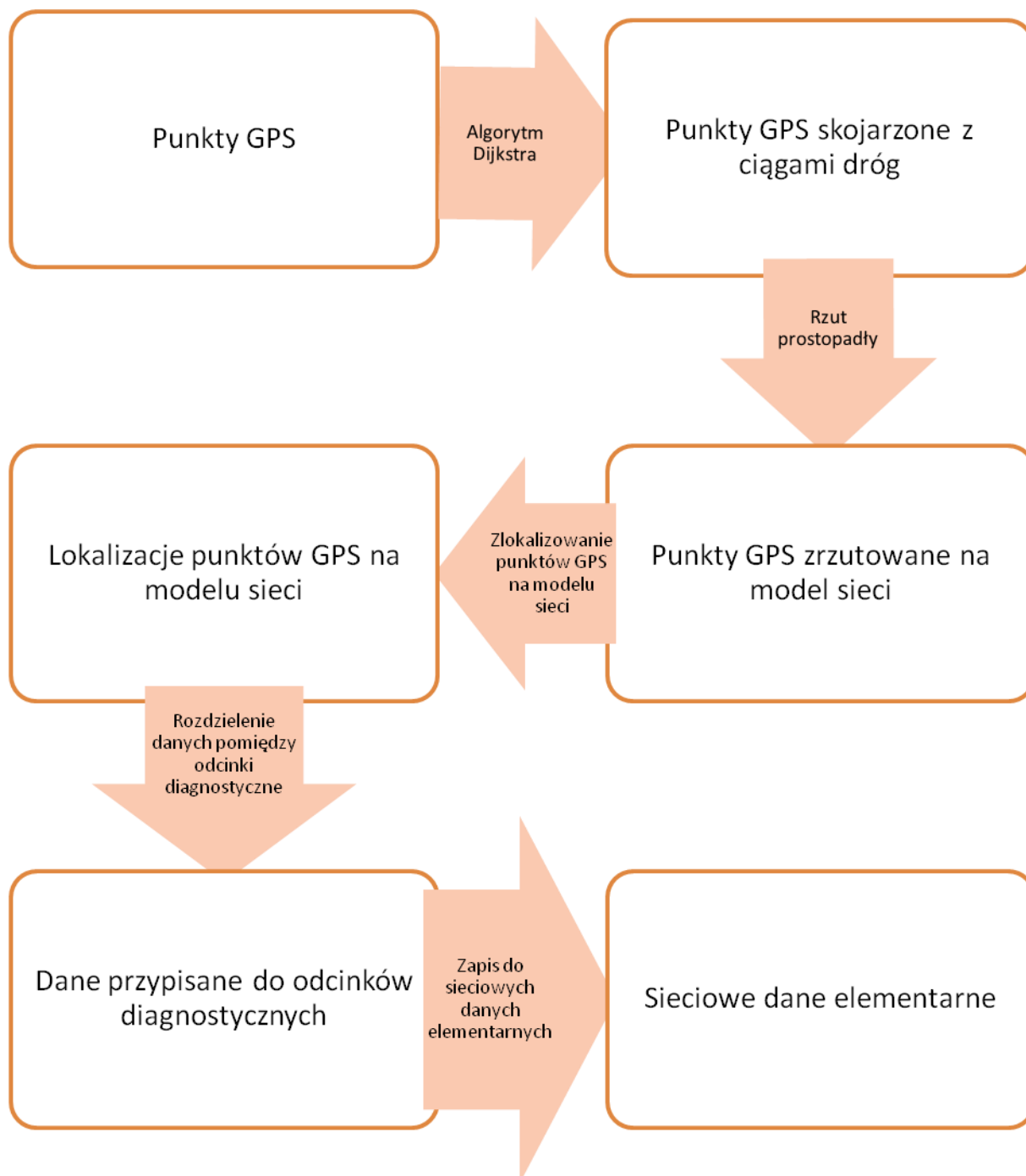
Sieciowe dane elementarne spełniają następujące warunki:

- **Przypisanie do odcinków referencyjnych.** Wyniki pomiaru są zlokalizowane w obrębie odcinków referencyjnych, w obrębie których odbył się pomiar. Przypisanie do odcinków referencyjnych odbywa się na podstawie położenia geograficznego punktów pomiarowych. Wyznaczanie lokalizacji na modelu sieci odbywa się przy zastosowaniu zasady projekcji prostopadłej punktu pomiarowego na graf modelu sieci.
- **Określenie kierunku.** Dla wyników pomiaru jest ustalane, czy w obrębie poszczególnych odcinków referencyjnych pomiar odbywał się w kierunku zgodnym czy przeciwnym do narastania pikietażu. Jest to określane na podstawie przebiegu sekwencji punktów pomiarowych.
- **Rozdzielenie danych pomiędzy odcinki diagnostyczne.** W przypadku pomiaru obejmującego swoim zakresem więcej niż jeden odcinek diagnostyczny, wyniki pomiaru są rozdzielone pomiędzy odcinki diagnostyczne z dokładnością do jednego metra. W przypadku, gdy na X metrów, jakie liczy odcinek diagnostyczny przypadnie $Y > 110\% \cdot X$ lub $Y < 90\% \cdot X$ metrów bieżących pomiaru, dane zawarte w tym odcinku diagnostycznym oznaczane są jako nieważne (flaga ważności $G = -99$).
- **Rozdzielenie danych pomiędzy odcinki referencyjne.** W przypadku pomiaru obejmującego swoim zakresem więcej niż jeden odcinek referencyjny, wyniki pomiaru są rozdzielone pomiędzy odcinki referencyjne z dokładnością do jednego metra.
- **Określenie pasa ruchu.** Dla wyników pomiaru jest określone, po którym pasie ruchu odbywał się pomiar. Jest to określane na podstawie informacji zapisanych w geograficznych danych elementarnych.
- **„Przycięcie” do modelu sieci.** W wyjściowych plikach z sieciowymi danymi elementarnymi są zapisywane tylko dane zebrane na odcinkach referencyjnych, pochodzących z modelu sieci, zapisanego w pliku z danymi podstawowymi.

- **Przypisanie do odcinków diagnostycznych.** W wyjściowych plikach z sieciowymi danymi elementarnymi są zapisywane tylko dane zebrane w obrębie odcinków diagnostycznych, określonych przez wejściowy plik z danymi wynikowymi. Ten wejściowy plik z danymi wynikowymi określa podział modelu sieci na odcinki diagnostyczne.
- **Projekcja warunkowa przy niekompletnych lokalizacjach geograficznych.** W przypadku niekompletnych lub błędnych zapisów współrzędnych punktów pomiarowych wyniki pomiaru są lokalizowane w obrębie odcinka referencyjnego za pomocą metra bieżącego pod warunkiem, że geometria odcinka referencyjnego jest jednoznacznie opisana przez punkty geograficzne.
- **Przejmowanie najnowszych danych pomiarowych.** W przypadku wystąpienia na tej samej lokalizacji sieciowej więcej niż jednego prawidłowego pomiaru, w sieciowych danych elementarnych zapisane zostają najnowsze wyniki.
- **Oddzielenie danych z różnych przejazdów pomiarowych.** W ramach jednego odcinka diagnostycznego w sieciowych danych elementarnych występują dane pochodzące wyłącznie z jednego przejazdu pomiarowego.
- **Lokalizacja zdjęć i punktów geograficznych na modelu sieci.** Informacje o zdjęciach oraz informacje o położeniach geograficznych pojazdu pomiarowego są przyporządkowywane do modelu sieci przez przypisanie im odległości (w rozumieniu odległości od punktu referencyjnego modelu sieci) oraz umieszczenie ich w odpowiednim odcinku diagnostycznym.
- **Przejmowanie ważności danych z danych geograficznych.** Jeśli na odcinku diagnostycznym wystąpią dane oznaczone w danych geograficznych jako nieważne (flaga ważności $G < 0$), odcinek diagnostyczny także zostaje oznaczony jako zawierający nieważne dane. Przejmowana jest najniższa występująca w tych danych flaga G .
- **Przejmowanie prędkości pomiarowej z danych geograficznych.** Prędkość pomiarowa zapisana dla odcinka diagnostycznego jest pierwszą z prędkości zapisanych w geograficznych danych elementarnych na tym odcinku, patrząc w kierunku przejazdu. Zasada ta nie obowiązuje w ramach podprojektów PP-T.
- **Format.** Wynikowe sieciowe dane elementarne są zgodne z formatem, opisany w [T2/cz3].

3.4 Przebieg procedury rzutowania

Przebieg realizacji obliczeń w ramach procedury rzutowania.



Rysunek 2: Schemat przebiegu procedury projekcji

3.4.1 Zmodyfikowany algorytm Dijkstra

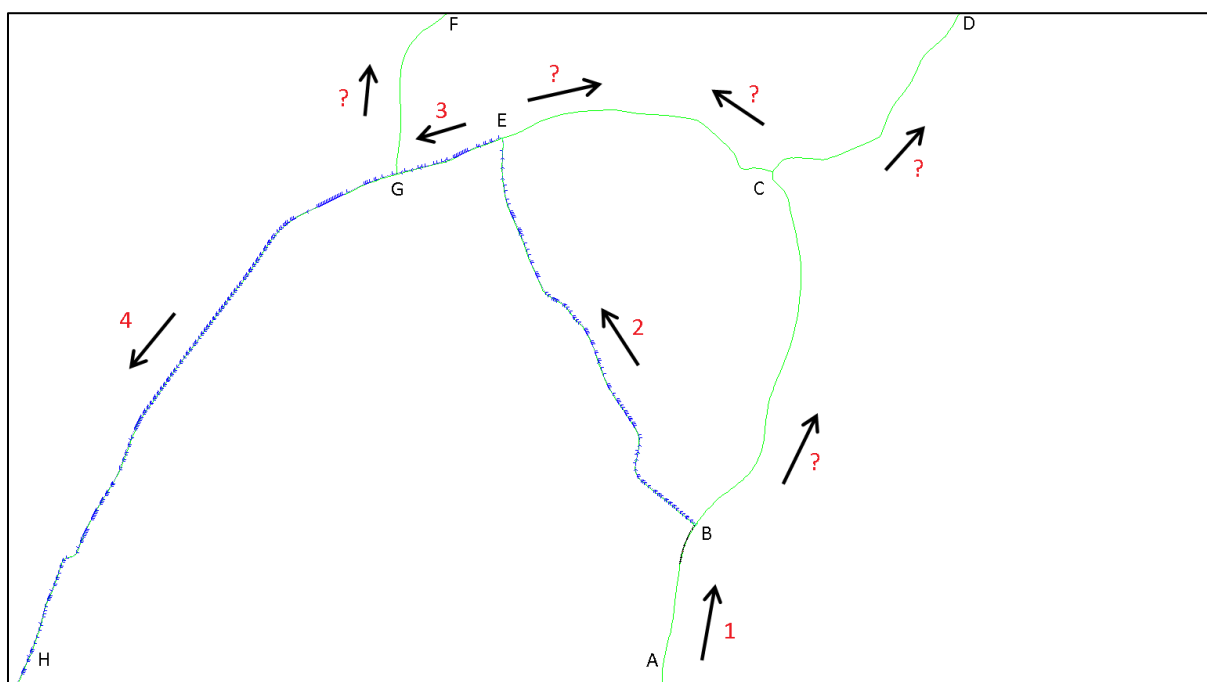
Do określenia odcinków referencyjnych, na których został wykonany pomiar, zastosowany jest zmodyfikowany algorytm Dijkstra. Oryginalny algorytm Dijkstra

służy do efektywnego wyszukania najkrótszej ścieżki w grafie przy zadanych, nieujemnych wagach krawędzi. Algorytm rozbudowuje drzewo możliwych ścieżek, z każdym krokiem wydłużając aktualnie najkrótszą ścieżkę, aż do odnalezienia poszukiwanej ścieżki.

Procedura zastosowana do wytypowania zmierzonej ścieżki w modelu sieci traktuje model sieci jako graf. W pierwszym kroku procedury zostaje znaleziony odcinek referencyjny, na którym pomiar się rozpoczyna. W kolejnych krokach wyznacza się ciąg potencjalnie odwiedzonych odcinków referencyjnych tworząc drzewo odzwierciedlające wszystkie potencjalnie przejechane ścieżki. W celu wyznaczenia faktycznie przejechanej ścieżki wybiera się tę ścieżkę, która najlepiej pasuje do trajektorii pomiaru. Ścieżki rozbudowywane są metodą wszerz (a nie w głąb) to znaczy, że w każdym kroku wydłużana jest jedna ścieżka, aktualnie najkrótsza. Po każdym wydłużeniu ścieżka jest analizowana (obliczany jest współczynnik dopasowania kształtu WDK, patrz 3.4.2). W wypadku znacznej rozbieżności aktualnej ścieżki zatrzymywane jest jej dalsze wydłużanie, co pozwala na znaczne przyspieszenie obliczeń.

Na tym etapie wyznaczony zostaje także kierunek przejazdu po odcinkach referencyjnych, gdyż ścieżki modelu sieci są zorientowane.

Na rysunku 3 pokazano przykładowy model sieci (zielone linie) i trajektorię przejazdu pomiarowego (niebieski). Określenie odcinków referencyjnych, po których odbył się pomiar rozpoczyna się od ustalenia odcinka początkowego. Pierwszy punkt przejazdu pomiarowego jest rzutowany na wszystkie odcinki referencyjne i wybierany jest odcinek leżący najbliżej (w przykładzie jest to odcinek A-B). Odcinek A-B stanowi korzeń budowanego drzewa.



Rysunek 3: Poglądowa ilustracja etapu wyznaczenia przejechanej ścieżki na modelu sieci – punkty pomiarowe są oznaczone niebieskim kolorem

Następnie od odcinka początkowego A-B budowana jest dalsza trasa przejazdu. Dobierane są kolejne odcinki, które mogą potencjalnie tworzyć ścieżkę przejazdu. Za odcinkiem A-B możliwe jest odwiedzenie odcinka B-C lub B-E. Po B-C możliwe kontynuacje to C-D i C-E. Natomiast po B-E to E-C oraz E-G. W analogiczny sposób budowane jest całe drzewo wszystkich możliwych kontynuacji dla danej topologii modelu sieci. Rozbudowa drzewa ścieżek kończy się w momencie osiągnięcia przez wszystkie gałęzie długości równej lub większej niż długość przejazdu pomiarowego. Budowa gałęzi jest przerywana także, gdy jej WDK (patrz 3.4.2) przekroczy krytyczną wartość. Ta optymalizacja w znaczny sposób zwiększa wydajność algorytmu.

Na koniec pozostaje wybranie najbardziej prawdopodobnej ścieżki, po której faktycznie odbył się przejazd pomiarowy. W tym celu dla każdej ścieżki obliczany jest WDK ścieżki oraz śladu przejazdu pomiarowego (patrz 3.4.2).

Wynikiem działania tego algorytmu jest lista odcinków sieciowych na modelu sieci, na których był wykonany pomiar. Rysunek 3 ilustruje przykład, gdzie wynikiem będzie lista: A-B; B-E; E-G; G-H. Każdy odcinek sieciowy ma ponadto określony kierunek przejazdu.

3.4.2 Współczynnik dopasowania kształtu (WDK)

Współczynnik dopasowania kształtu (WDK) opisuje dopasowanie danej ścieżki na modelu sieci do trajektorii przejazdu pomiarowego. Im ten współczynnik jest mniejszy, tym ścieżka jest lepiej dopasowana do przejazdu pomiarowego. Szukając ścieżki faktycznie przejechanej przez przejazd pomiarowy, szukamy ścieżki o najniższym WDK.

Sposób obliczenia tego współczynnika ma decydujące znaczenie dla poprawności algorytmu, szczególnie w przypadkach niedokładnych współrzędnych punktów pomiarowych, gdy występowały zaniki sygnału z satelitów lub sam model geometrii sieci nie jest wystarczająco precyzyjny z powodu niedokładności lub celowych uproszczeń przebiegu dróg.

Obliczenie współczynnika dopasowania kształtu wymaga przejrzenia współrzędnych GPS wszystkich punktów pomiarowych oraz odpowiadających im punktów na modelu sieci. Punkt na modelu sieci, korespondujący z punktem pomiarowym jest obliczany z kształtu ścieżki i wartości metra bieżącego pomiaru. Dla każdej pary punktów (pozycja GPS punktu pomiarowego; pozycja na modelu sieci) obliczana jest odległość między nimi.

Współczynnik dopasowania kształtu WDK obliczany jest według empirycznego wzoru:

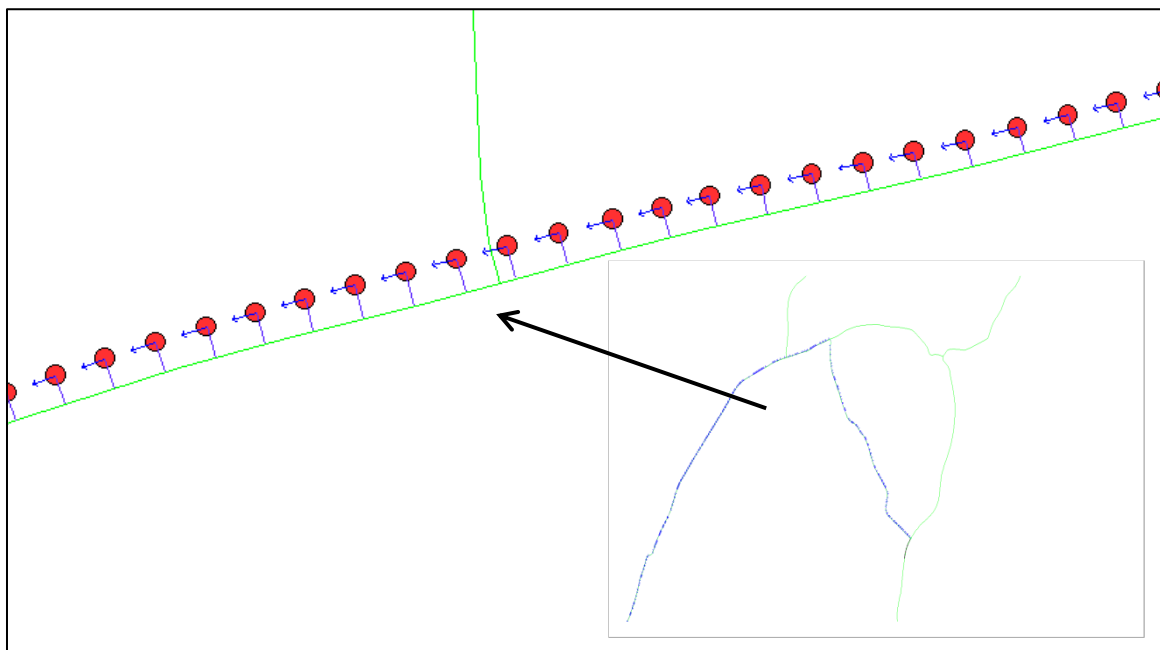
$$WDK = A + \frac{M}{10} + L + P + D$$

gdzie:

- A - średnia odległość pomiędzy punktami,
- M - maksymalna odległość pomiędzy punktami,
- L - liczba punktów pomiarowych, które nie mają odpowiednika na modelu sieci (nie były dopasowane do przebiegu na modelu sieci),
- P - współczynnik określający preferencje dla pomiarów zgodnych z kierunkiem wzrostu pikietażu. Uaktywnia się tylko dla ścieżek tak samo dobrze dopasowanych przed jego dodaniem. Jego wartość wynosi $-0,00001$, jeśli pomiar na ostatnim odcinku modelu sieci odbył się w kierunku zgodnym z pikietażem, zaś 0 - jeśli pomiar na ostatnim odcinku modelu sieci odbył się w kierunku przeciwnym,
- D - odległość ostatniego punktu pomiarowego z pomiaru od tzw. punktu PH na modelu sieci. Punkt PH (projection hint) pozwala wpływać z zewnątrz (poprzez ingerencję użytkownika programu) na sposób wybór właściwej trasy na modelu sieci.

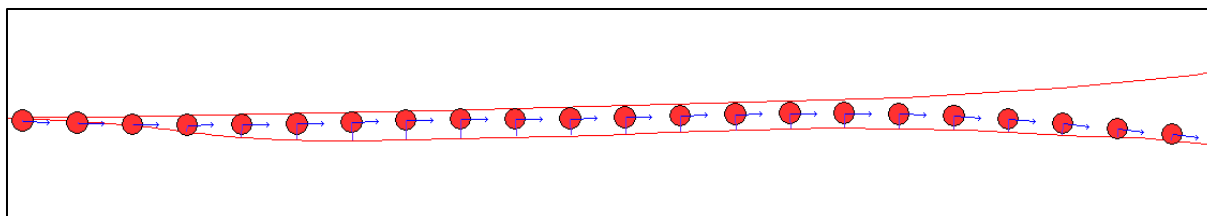
3.4.3 Rzut prostopadły

Dla wyznaczonej w punkcie 3.4.1 ścieżki punkty pomiarowe rzutowane są prostopadłe na łamane reprezentujące geometrię tej ścieżki w modelu sieci (patrz rysunek 4).



Rysunek 4: Ilustracja rzutu prostopadłego punktów pomiarowych na łamane modelu sieci, czerwone punkty oznaczają lokalizacje punktów pomiarowych

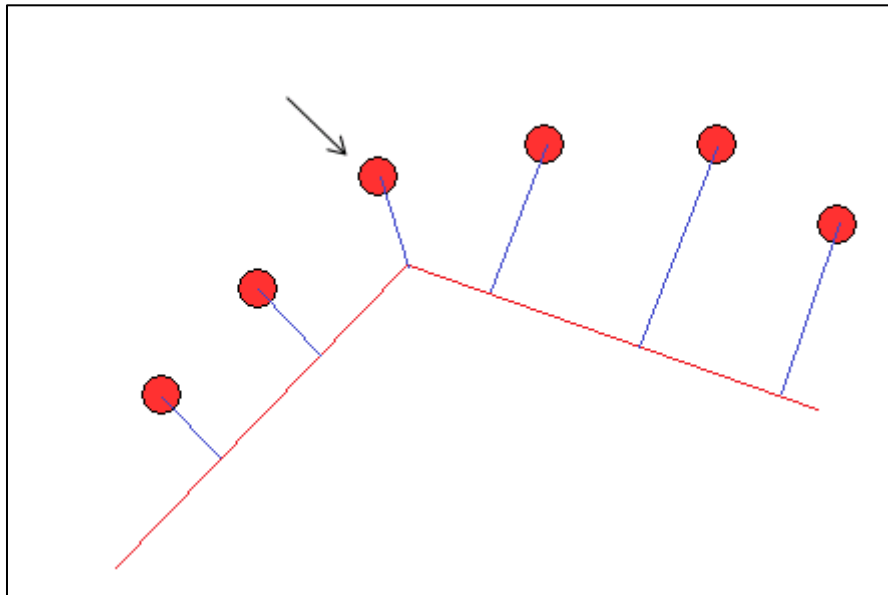
Punkty pomiarowe rzutowane są wyłącznie na odcinki sieciowe, wyznaczone w poprzednim kroku. Pozwala to uniknąć błędnego rzutowania na obce odcinki, które miejscami mogą zbliżać się do punktów pomiarowych przejazdu (rysunek 5).



Rysunek 5: Punkty pomiarowe rzutowane są wyłącznie na odcinki należące do listy odwiedzonych odcinków sieciowych

Rzutowanie punktów pomiarowych w miejscach załamań polilinii modelu sieci może nie być rzutem prostopadłym, lecz przypisaniem do najbliższego miejsca na modelu sieci (rysunek 6).

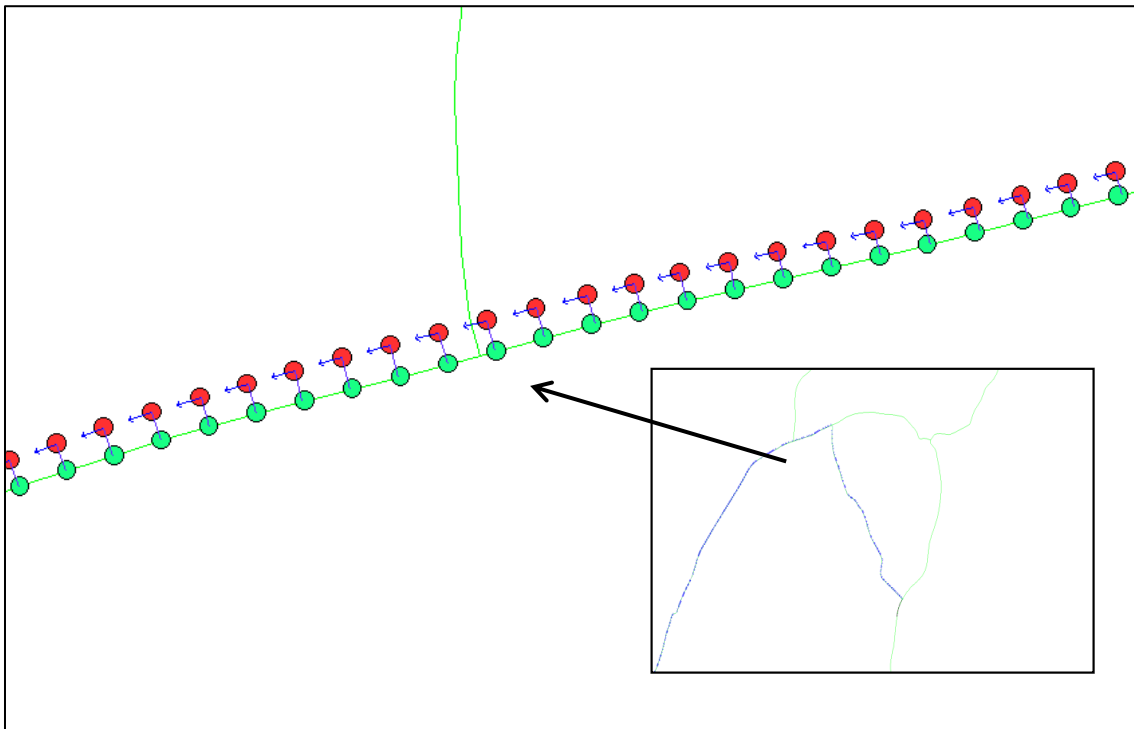
Jeśli przypisanie punktu pomiarowego wypada dokładnie w punkcie referencyjnym, może być on przypisany do któregośkolwiek z dwóch odcinków dochodzących do tego punktu. Nie ma to wpływu na wynik projekcji.



Rysunek 6: Rzutowanie niektórych punktów pomiarowych nie jest rzutem prostopadłym sensu stricto

3.4.4 Zlokalizowanie punktów pomiarowych na modelu sieci

W kolejnym kroku oblicza się lokalizacje sieciowe (odcinek referencyjny i odległość od jego początku) dla wszystkich rzutów punktów pomiarowych należących do przejazdu pomiarowego i znajdujących się w obrębie modelu sieci. Wykonuje się to wykorzystując zestawienie narastania metra bieżącego pomiaru z narastaniem pikietażu dla kolejnych punktów pomiarowych, patrz rysunek 7.



Rysunek 7: Ilustracja przypisania punktów pomiarowych do modelu sieci, czerwone punkty oznaczają lokalizacje punktów pomiarowych, zielone - ich lokalizacje po przypisaniu do modelu sieci

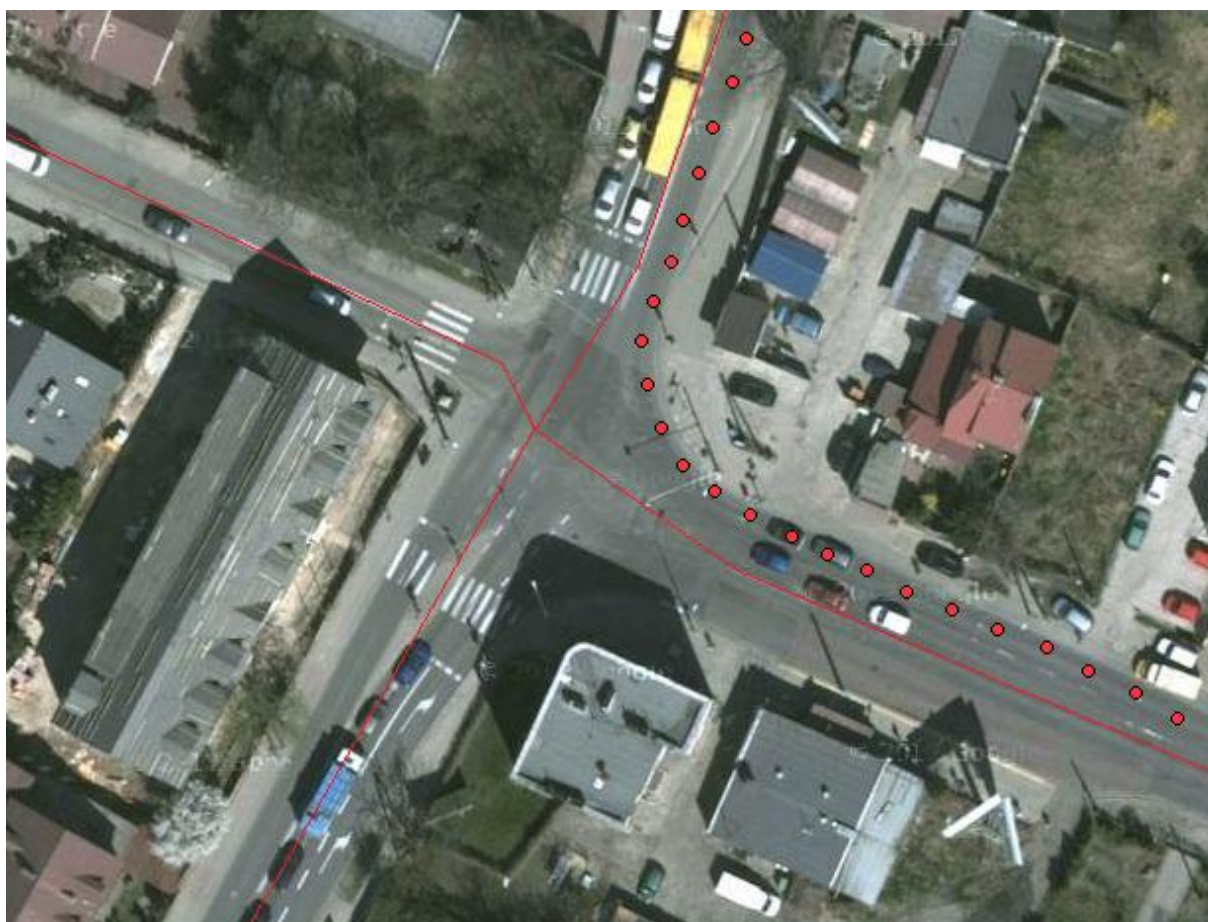
3.4.5 Rozdzielenie pomiędzy odcinki diagnostyczne

Na podstawie lokalizacji punktów pomiarowych na modelu sieci przypisuje się je do odcinków diagnostycznych. Wykonuje się to wykorzystując zestawienie narastania metra bieżącego pomiaru z narastaniem pikietażu dla kolejnych punktów pomiarowych. Przy okazji określone zostaje, na jakim metrze bieżącym pomiaru przypadają kolejne odcinki diagnostyczne oraz lokalizacje sieciowe zdjęć i ich przypisanie do odcinków diagnostycznych.

Na tym etapie następuje adaptacja ilości zebranych danych (ilości zbadanych metrów nawierzchni) do długości odcinków zapisanych w modelu sieci. W przypadku niedoskonałości geometrii sieci lub zapisanych długości następuje rozciąganie lub ściskanie danych (w ramach tolerancji opisanych w rozdziale 3.3) tak, aby na danym odcinku diagnostycznym znalazły się tylko i wyłącznie dane zmierzone w jego obrębie.

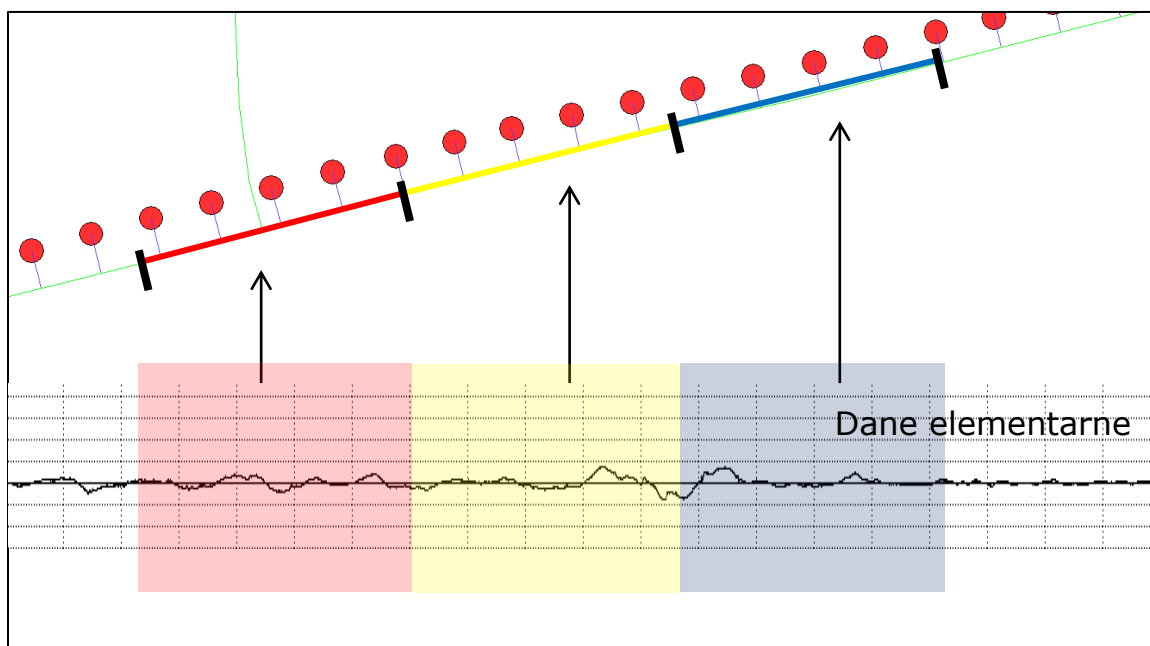
Ściskanie lub rozciąganie danych elementarnych polega na umieszczeniu do 10% więcej lub mniej danych pomiarowych w sieciowym odcinku diagnostycznym niż wynikałoby to z jego deklarowanych rozmiarów. Sytuacja taka występuje najczęściej na zakrętach o małym promieniu (rysunek 8), gdzie przejazd

pomiarowy i kształt modelu sieci nie przystają do siebie. Na przykład szeroka droga zamodelowana linią łamaną umieszczoną w osi drogi, pomiędzy jezdniami.



Rysunek 8: Przejazd pomiarowy (czerwone punkty)

Algorytmy rzutowania uwzględniają odcinki diagnostyczne z ilościami danych w zakresie dozwolonym przez format danych elementarnych, patrz rysunek 9.



Rysunek 9: Schematyczna ilustracja rozdzielania danych elementarnych pomiędzy odcinki diagnostyczne

3.4.6 Utworzenie sieciowych danych elementarnych

Dane są porządkowane zgodnie z numerami dróg, odcinkami referencyjnymi, numerami jezdni i pasa, kierunkami. W przypadku, gdy wystąpiły dwa pomiary z dwóch przejazdów na jednym odcinku diagnostycznym jest rozstrzygane, który pomiar jest najaktualniejszy i odpowiednie dane są przejmowane do sieciowych danych elementarnych.

Dane po reorganizacji i przypisaniu do modelu sieci zapisywane są w sieciowych danych elementarnych zgodnie z formatem opisanym w [T2/cz3].

4 Procedury obliczania wielkości stanu

4.1 Równość podłużna

4.1.1 IRI – międzynarodowy wskaźnik równości

Międzynarodowy wskaźnik równości obliczany jest dla profilu nierówności zapisanego w sieciowych danych elementarnych, niezależnie dla danego odcinka diagnostycznego zgodnie z obowiązującym standardem [DOK1].

4.1.2 AUN – gęstość spektralna nierówności

Podstawą wyliczenia AUN jest profil nierówności zapisany w sieciowych danych elementarnych dla danego odcinka diagnostycznego, rozszerzonego równomiernie z obu stron do długości 100 metrów za pomocą danych z sąsiadujących odcinków, bądź danych rozbiegowych i pobiegowych.

4.1.2.1 Użyte symbole

Symbole użyte we wzorach podane są w tablicy 1.

Tablica 1: Symbole użyte przy obliczaniu AUN

Symbol	Opis	Jednostka
λ	Długość fali	m
n	Częstotliwość przestrzenna	cykle/m
Ω	Częstotliwość kątowna przestrzenna ($= 2\pi n$)	rad/m
v	Prędkość pojazdu pomiarowego	m/s
f	Częstotliwość	Hz
ω	Częstotliwość kątowna ($= 2\pi f$)	rad/s
$G_d(\cdot)$	PSD (gęstość widmowa) profilu	m^3
$G_v(\cdot)$	PSD pierwszej pochodnej profilu	m^1
$G_a(\cdot)$	PSD drugiej pochodnej profilu	m^{-1}

Symbol	Opis	Jednostka
$G_{d,k}^*$	PSD profilu	m^3
$G_{d,k}$	Poprawione PSD profilu	m^3
$G_{s,k}$	Wygładzone PSD profilu	m^3
$V_d(\cdot)$	Funkcja transmitancji	-
B_e	Rozdzielczość częstotliwości przestrzennej ($= \frac{1}{N \cdot \Delta x}$)	cykle/m
Ω_{min}	Rozdzielczość częstotliwości kątowej przestrzennej ($= 2\pi B_e$)	rad/m
Ω_{max}	Maksymalna częstotliwość kątowa przestrzenna	rad/m
h_i	Wysokość punktu profilu na pozycji i	m
Δx	Odstęp między punktami wysokościowymi profilu	m
L	Długość odcinka	m
N'	Liczba punktów wysokościowych profilu dla średniej kroczącej (liczba nieparzysta)	-
N	Liczba punktów wysokościowych profilu dla transformaty Fouriera (2^c , c całkowita)	-
H_i	Profil po średniej kroczącej	m
C_i	Okno Tukey'a (CDTW)	-
C	Współczynnik wagi dla CDTW	-
y_i	Wysokość punktu profilu na pozycji i tej profilu wejściowego do FFT	m
$\underline{Y}_k$	Transformata Fouriera profilu	m
Ω_0	Nominalna prędkość kątowa przestrzenna	rad/m
W	Falistość	-

4.1.2.2 Definicje

Niniejszy opis wyliczenia AUN posługuje się następującymi definicjami:

- **Częstotliwość kątowna przestrzenna (Ω)** [rad/m]:

$$\Omega = 2\pi/\lambda$$

Widmowa gęstość mocy (PSD^4 , G): Graniczna wartość średnich kwadratów wahań sygnału na jednostkę pasma częstotliwości. Przy jednostronnym widmie jej całka równa jest odchyleniu (σ^2) wyjściowego profilu dla danego pasma częstotliwości (Ω_{min} do Ω_{max}):

$$\sigma^2 = 2\pi \int_{n_{min}}^{n_{max}} G(n)dn = \int_{\Omega_{min}}^{\Omega_{max}} G(\Omega)d\Omega;$$

przy częstotliwości przestrzennej $n = \frac{1}{\lambda}$.

To prowadzi do podwojenia amplitudy widmowej, jeśli proces obliczania wyznacza jedynie widmo dla dodatnich częstotliwości

- **PSD odkształceń (G_d):** PSD punktów wysokościowych profilu.
- **PSD prędkości (G_v):** PSD szybkości zmiany pionowego odkształcenia profilu na jednostkę przejechanej drogi (nachylenia profilu).
- **PSD przyspieszenia (G_a):** PSD szybkości zmiany nachylenia profilu na jednostkę przejechanej drogi.
- **Poprawka funkcji transmitancji:** Procedura uwzględnienia wpływu funkcji transmitancji systemu pomiarowego na PSD. Surowa PSD powinna przed dalszym przetwarzaniem zostać poprawiona, a mianowicie podzielona przez kwadrat modułu funkcji transmitancji systemu pomiarowego.
- **Wyglądanie:** Proces uśredniający, przy którym blok danych jest przesuwany i uśredniany.
- **Odcinek:** Określony fragment profilu podłużnego, dla którego obliczana jest wielkość AUN.

4.1.2.3 Wybór metody PSD

Zgodnie z opisem profilu w [DOK2], dane mogą być rozpatrywane na podstawie jednej z dwóch metod: za pomocą PSD profilu (G_d) lub na podstawie PSD przyspieszeń (G_a). W niniejszym dokumencie bierze się pod uwagę jedynie pierwszą z metod. Wynik może być przeniesiony na drugą metodę wedle wzoru:

$$G_a(\Omega) = \Omega^4 \cdot G_d(\Omega)$$

⁴ PSD – ang. power spectral density

4.1.2.4 Wymagania dla profilu

Profil przygotowany jest zgodnie z [T1/cz3].

4.1.2.5 Procedura obliczenia AUN

Obliczenie AUN przebiega w następujących krokach. Zostały one zilustrowane na rysunku 10.

Średnia krocząca

Aby mogła zostać obliczona PSD, muszą zostać wykonane dwa kroki przygotowawcze: wyeliminowanie przesunięcia sygnału oraz wyrównanie trendu. Jest to przeprowadzone przy pomocy średniej kroczącej.

Proces filtrowania metodą średniej kroczącej jest zdefiniowany dla danego odcinka o długości $L' = N' \cdot \Delta x$. W tym procesie, każda próbka będąca w środku odcinka jest zastępowana przez różnicę między nią a średnią tego odcinka.

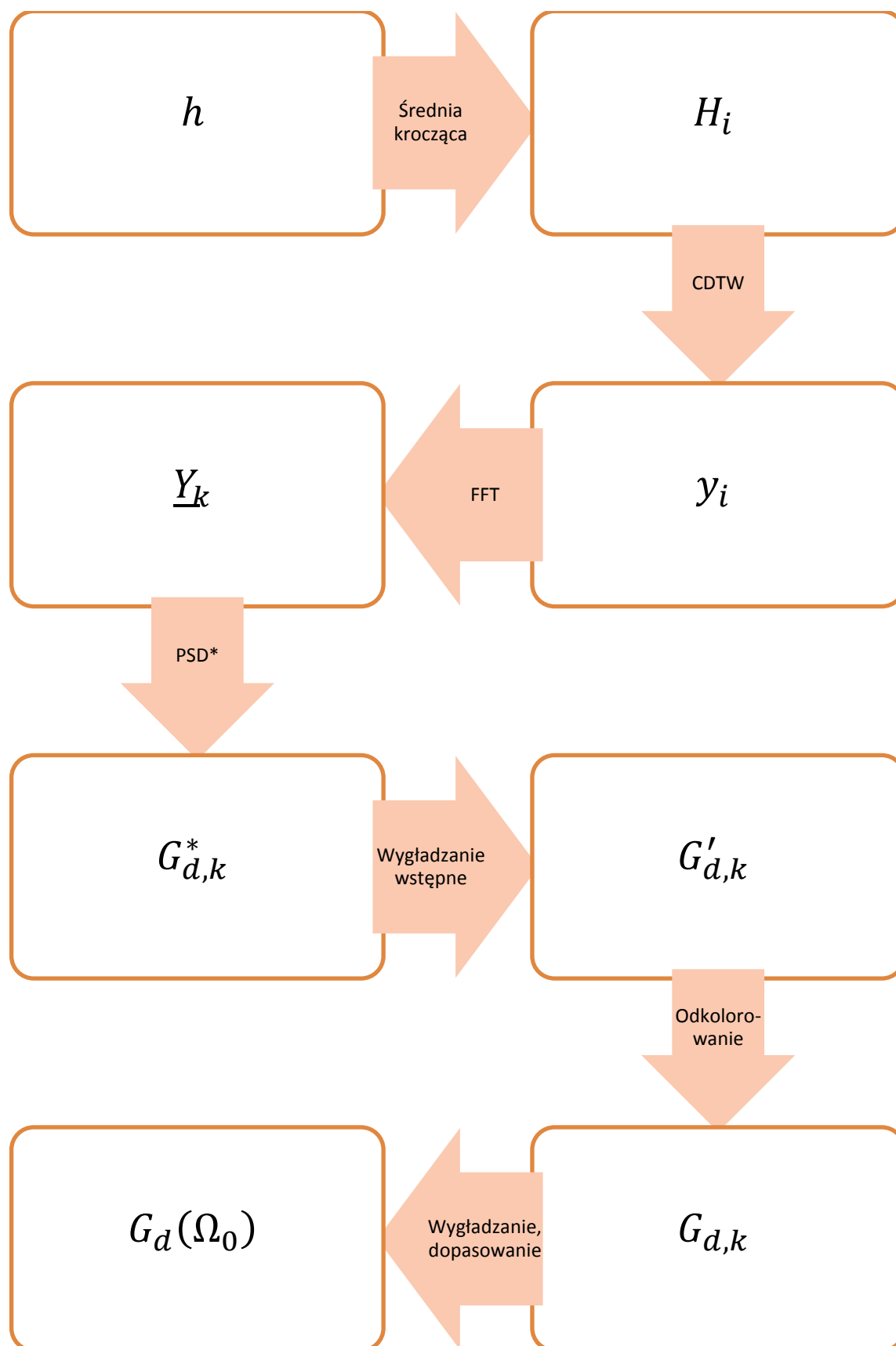
Wyraża się to wzorem:

$$H_i = h_i - \frac{1}{N'} \sum_{j=-\frac{N'-1}{2}}^{\frac{N'-1}{2}} h_{i+j}$$

Aby otrzymać średnią krocząca w obszarze $i_1 \Delta x \leq i \Delta x \leq i_2 \Delta x$, należy mieć dostępny przebieg profilu w obszarze

$$\left(i_1 - \frac{N' - 1}{2}\right) \Delta x \leq j \Delta x \leq \left(i_2 + \frac{N' - 1}{2}\right) \Delta x$$

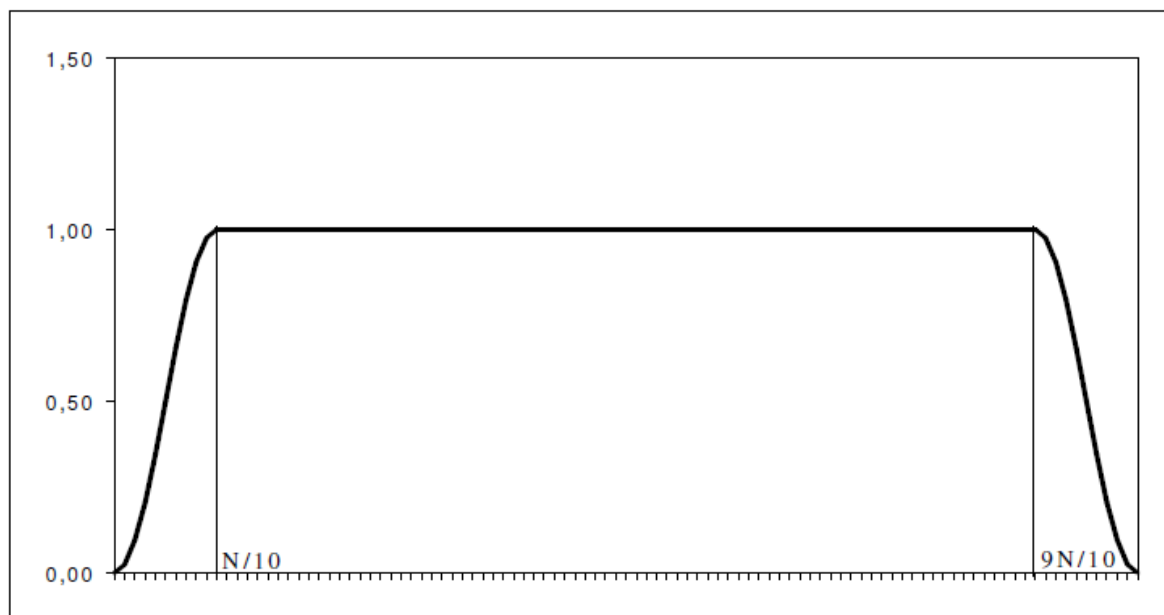
W ten sposób przetworzony profil posiada górną granicę częstotliwości przestrzennej n_{max} równą około $\frac{1}{2\Delta x}$. Dolna granica częstotliwości przestrzennej n_{min} wynosi około $\frac{1}{N' \cdot \Delta x}$, gdzie $N' \cdot \Delta x$ jest długością zastosowanej średniej kroczącej.



Rysunek 10: Przebieg obliczenia gęstości spektralnej AUN

CDTW

W celu zredukowania błędu wynikającego z ograniczenia profilu (ang. *leakage*), dane będą zważone przy pomocy okna Tukey'a (CDTW – ang. *Cosine Digital Tapering Window*). Okno CDTW o długości $L = N \cdot \Delta x$ jest zdefiniowane jako rosnący/malejący fragment kwadratu funkcji cosinus w pierwszej/ostatniej dziesiątej części długości. W pozostałym obszarze długości CDTW wynosi stałą równą 1.



Rysunek 11: Wykres funkcji okna CDTW

Współczynnik wagi CDTW wyraża się następującym wzorem:

$$C_i = \begin{cases} \cos^2\left(\frac{5\pi \cdot i}{N} - \frac{\pi}{2}\right) & 0 \leq i < \frac{N}{10} \\ 1 & \frac{N}{10} \leq i \leq \frac{9N}{10} \\ \cos^2\left(\frac{5\pi \cdot i}{N} - \frac{9\pi}{N}\right) & \frac{9N}{10} < i \leq N \end{cases}$$

Współczynnik wagi dla CDTW, wykorzystywany później do skorygowania amplitudy wynosi:

$$C = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} C_i^2 = 0,875$$

Sposób uwzględnienia CDTW wyrażony jest wzorem w następnym punkcie.

Wycentrowanie

Aby przetwarzać odcinek o długości L zawierający N wysokości profilu y_i należy go ustawić w następujący sposób:

$$y_i = C_{i-k} H_{i-k},$$

gdzie:

$$k = \frac{N - \frac{L}{\Delta x}}{2} - 1 = 11,$$

H_i jest wysokością profilu po zastosowaniu średniej kroczącej.

FFT

W celu przejścia do dziedziny częstotliwości stosuje się dyskretną transformatę Fouriera:

$$\underline{Y}_k = \sum_{j=0}^{N'} y_j e^{-\frac{2\pi i k j}{N}} \quad \text{dla } k = 0, 1, 2, \dots, N'.$$

Częstotliwości kątowe przestrzenne są wyrażane przez:

$$\Omega_k = \frac{k}{N} \frac{2\pi}{\Delta x}$$

Obliczenie surowej gęstości widmowej (PSD*)

Gęstość widmowa jest znormalizowaną wartością kwadratu modułu transformaty Fouriera:

$$G_{d,k}^* = \frac{1}{C} \frac{1}{N \Omega_{max}} |\underline{Y}_k|^2$$

gdzie $C = 0,875$, kompensuje zmniejszenie amplitud przez obcięcie oknem.

Wyglądanie wstępne

Do surowej gęstości spektralnej $G_{d,k}^*$ należy zastosować trójpunktowe wyglądzanie w celu ograniczenia błędów losowych:

$$G'_{d,0} = 0,5 \cdot G_{d,0}^* + 0,5 \cdot G_{d,1}^*$$

$$G'_{d,k} = 0,25 \cdot G_{d,k-1}^* + 0,5 \cdot G_{d,k}^* + 0,25 \cdot G_{d,k+1}^*, \text{ gdzie } k = 1, 2, \dots, \frac{N}{2} - 1.$$

$$G'_{d,\frac{N}{2}} = 0,5 \cdot G_{d,\frac{N}{2}-1}^* + 0,5 \cdot G_{d,\frac{N}{2}}^*$$

Odkolorowanie

Zgodnie z [DOK2] w celu uzyskania PSD, dzieli się wynik przez kwadrat modułu funkcji transmitancji ($V_d(\Omega_k)$) systemu pomiarowego. Na potrzeby niniejszego algorytmu przyjmuje się jednak stałą $V_d \equiv 1$.

$$G_{d,k} = G_d(\Omega_k) = \frac{G'_{d,k}}{|V_d(\Omega_k)|^2}.$$

Wygładzanie

Wygładzanie w pasmach wykonuje się wedle rozdziału 5.1.2 i tabeli 2 w [DOK2].

Jeśli wartości PSD obliczane są metodą jednorodną dla poszczególnych pasm na wykresie log-log przy wysokich częstotliwościach pojawi się zbytnie uwydatnienie fluktuacji PSD. Z tej przyczyny PSD jest wygładzane w następujących pasmach oktaowych częstotliwości:

- pasmo oktaowe od najniższej obliczanej częstotliwości 0,0098 cykli/m (0,06136 rad/m) do średniej częstotliwości 0,0312 cykli/m (0,1960 rad/m),
- dla pasma jednej trzeciej oktawy od ostatniego pasma oktaowego do częstotliwości 0,25 cykli/m (1,5709 rad/m),
- dla pasma jednej szóstej oktawy od ostatniego pasma jednej trzeciej oktawy do średniej częstotliwości 1,00 cykl/m (6,2832 rad/m),
- reszta – dla pasma jednej dwunastej oktawy aż do najwyższej obliczanej częstotliwości 5,00 cykli/m (31,4159 rad/m).

W celu obliczenia używanych częstotliwości średnich wykorzystuje się następujące wzory:

Dla $n_H > n_L + 1$ (więcej niż dwa uwzględniane składniki częstotliwości PSD w paśmie i -tym) mamy:

$$G_s(i) = \frac{[(n_L + 0,5) \cdot B_e - n_l(i)]}{n_h(i) - n_l(i)} \cdot G(n_L) + \frac{\sum_{j=n_L+1}^{n_H-1} G(j) \cdot B_e}{n_h(i) - n_l(i)} + \frac{[n_h(i) - (n_H - 0,5) \cdot B_e]}{n_h(i) - n_l(i)} \cdot G(n_H) \quad (1) \quad (2) \quad (3)$$

gdzie $G_s(i)$ jest wygładzoną PSD w paśmie wygładzania a

$$n_H = \left\lfloor \frac{n_h(i)}{B_e} + 0,5 \right\rfloor$$

$$n_L = \left\lfloor \frac{n_l(i)}{B_e} + 0,5 \right\rfloor$$

$$B_e = \frac{1}{N \cdot \Delta x}$$

n_H i n_L są wartościami pierwszego i ostatniego branego pod uwagę składnika częstotliwości PSD w danym paśmie.

Dodatkowe definicje do [DOK2] dla przypadków specjalnych:

- Dla $n_H = n_L$ mamy $G_s(i) = G_s(n_H = n_L)$, czyli tylko jeden składnik częstotliwości brany pod uwagę;
- Dla $n_H = n_L + 1$ należy obliczyć jedynie wyrażenia (1) i (3) z powyższego wzoru na $G_s(i)$, czyli mamy tylko dwa składniki częstotliwości brane pod uwagę;
- Dla ostatniego górnego pasma (tzn. kiedy $n_{A(i)} > (n_{MAX} + 0,5) \cdot B_e$) należy obliczyć wyłącznie wyrażenia (1) i (2) z powyższego wzoru na $G_s(i)$, przyjmując $n_{A(i)} = (n_{MAX} + 0,5) \cdot B_e$ oraz sumowanie w wyrażeniu (2) z $j = n_L + 1$ na n_{MAX} , gdzie n_{MAX} jest najwyższym brany pod uwagę składnikiem częstotliwości w procesie wygładzania;
- Dolna częstotliwość graniczna n_l , częstotliwość średnia n_c oraz górna częstotliwość graniczna n_h mogą zostać wyprowadzone z: $n_l = 2^{c-\frac{b}{2}} \text{ m}^{-1}$, $n_c = 2^c \text{ m}^{-1}$ oraz $n_h = 2^{c+\frac{b}{2}} \text{ m}^{-1}$, gdzie c jest wykładnikiem a b szerokością pasma:
 - dla pasma oktawowego: $b = 1$; $c = -9, -8, \dots, -5$
 - dla pasma jednej trzeciej oktawy: $b = 1/3$; $c = -4\frac{1}{3}, -4, \dots, -2$
 - dla pasma jednej szóstej oktawy: $b = 1/6$; $c = -1\frac{5}{6}, -1\frac{2}{3}, \dots, 0$
 - dla pasma jednej dwunastej oktawy: $b = 1/12$; $c = \frac{1}{12}, \frac{1}{6}, \dots$

Dopasowanie

Dopasowanie do PSD prostej regresji (patrz [DOK2] rozdział B.4) prowadzi do następującego równania:

$G_d(\Omega_k) = G_d(\Omega_0) \cdot \left(\frac{\Omega_k}{\Omega_0}\right)^{-w}$, gdzie Ω_0 jest częstotliwością kątową przestrzenną nominalną równą 1 rad/m, co odpowiada długości fali λ równej 2π metrów.

Za AUN przyjmuje się $G_d(\Omega_0)$, co wyraża miarę nierówności.

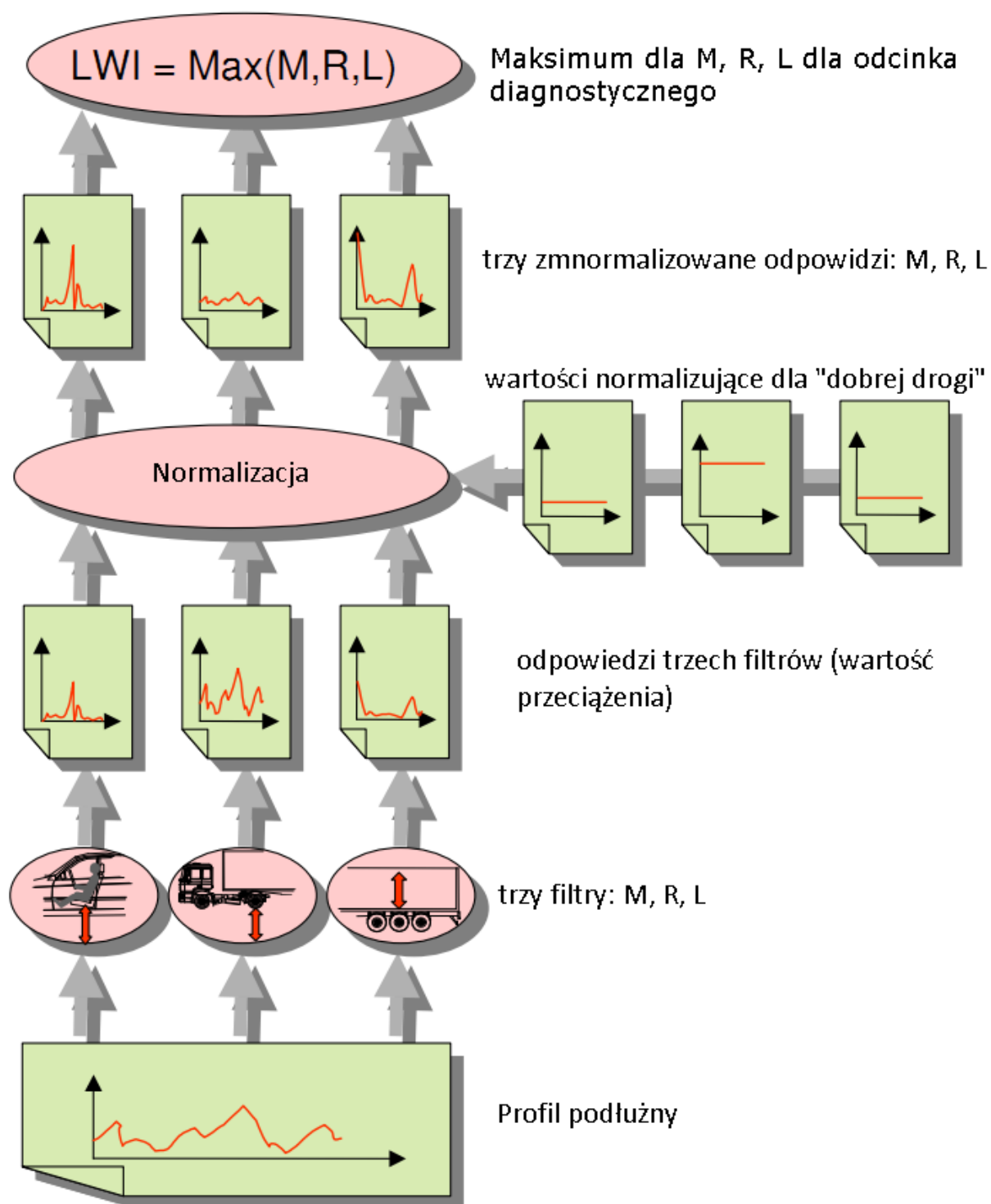
4.1.3 LWI – wskaźnik oddziaływania nierówności

Dla profilu podłużnego oblicza się odpowiedź układu dynamicznego opisującego zawieszenie pojazdu i określa generowane w ten sposób przeciążenia pionowe. Stosowane są trzy modele zawieszenia, modelujące trzy istotne elementy, na które oddziałują nierówności:

- oddziaływanie wstrząsów na kierowcę (filtr M),
- oddziaływanie uderzeń kół na nawierzchnię (filtr R),

- oddziaływanie wstrząsów na ładunek na przykładzie trzyosiowej naczepy (filtr L).

Dla każdego z tych typów oddziaływań przygotowany jest model dynamiczny oraz obliczona jest funkcja odpowiedzi jednostkowej. Odpowiedź każdego modelu na przejazd po badanym profilu jest następnie normalizowana a wartość maksymalna w obrębie odcinka diagnostycznego jest wartością parametru LWI.



Rysunek 12: Schemat obliczania wielkości LWI

4.1.3.1 Dane wejściowe: rzeczywisty profil podłużny

Do obliczenia wartości LWI wymagany jest taki sam rzeczywisty profil podłużny, jak przy obliczaniu parametru AUN (patrz 4.1.2). Profil **nie jest** filtrowany wstępnie przy pomocy średniej kroczącej.

4.1.3.2 Przygotowanie profilu do filtrowania

Parametr LWI jest obliczany dla 50m odcinka diagnostycznego na podstawie profilu podłużnego. Z uwagi na wymagania algorytmu szybkiej transformaty Fouriera profili musi być wydłużony do długości 4096 próbek (czyli punktów wysokościowych).

Przed i za fragmentem profilu w obrębie odcinka diagnostycznego umieścić należy wartości zmierzone przed i za profilem, jeśli pozwalają utworzyć jeden ciągły profil. Jeśli nie ma odpowiedniej ilości danych do uzupełnienia profilu należy wykonać tzw. padding. Polega to na powtórzeniu pierwszej próbki dla uzupełnienia początku profilu i powtórzeniu ostatniej próbki dla uzupełnienia końca profilu.

4.1.3.3 Filtrowanie

Filtrowanie jest realizowane przez splot funkcji odpowiedzi jednostkowej z profilem podłużnym. Splot może być wydajnie obliczany przez mnożenie funkcji w dziedzinie częstotliwości, czyli przez przemnożenie ich transformat Fouriera. Aby było to możliwe, obie transformaty Fouriera muszą być wykonane na oknie o jednakowym rozmiarze. Na zakończenie obliczania splotu funkcji wykonywana jest odwrotna transformata Fouriera. Jako wynik uzyskany jest profil wynikowy o długości 4096 próbek.

4.1.3.4 Podniesienie do kwadratu wyniku filtrowania profilu

Obliczony wynik splotu z funkcją filtrującą musi być znormalizowany tak, aby uzyskać możliwość porównywania profilu przefiltrowanego każdym z trzech filtrów M, R i L. Przefiltrowany profil ma długość 4096 próbek, podczas gdy wejściowy profil odpowiadał 50m drogi (500 próbek). W tym miejscu należy także przyciąć przefiltrowany profil do odpowiedniej długości.

4.1.3.5 Normalizacja przefiltrowanego profilu

Po podniesieniu do kwadratu trzech przefiltrowanych profili ich wartości zostają podzielone przez odpowiednie współczynniki, które odpowiadają spodziewanej wartości na "referencyjnej dobrej drodze". Odpowiada to temu, jakie wartości

maksymalnej wygeneruje każdy z trzech filtrów dla referencyjnej drogi ($AUN=1\text{cm}^3$, $w=2$, patrz 4.1.2). Wartości referencyjne są następujące:

- dla filtra R: 3.05%,
- dla filtra L: $0.9793\text{ m}^2/\text{s}^4$,
- dla filtra M: $1.022\text{ m}^2/\text{s}^4$.

Wartości te wynikają z przebiegu funkcji filtrów.

4.1.3.6 Obliczenie wartości parametru LWI

Wartość parametru LWI jest maksymalną wartością, jaka pojawia się w jakimkolwiek z trzech przefiltrowanych profilach w obszarze analizowanego 50 metrowego odcinka diagnostycznego.

4.1.3.7 Szczegóły tworzenia filtrów

Informacje dotyczące trzech wykorzystywanych filtrów i ich funkcji transmitancji przedstawione zostaną poniżej. Rysunek 14, rysunek 16 i rysunek 17 zawierają przebiegi filtrów dla naczepy ciągnika siodłowego dla założonej prędkości 80 km/h, oddziaływania koła pojazdu ciężarowego na nawierzchnię dla prędkości 80 km/h oraz oddziaływania na kierowcę pojazdu osobowego przy prędkości 100 km/h.

Następujący związek:

częstotliwość w dziedzinie drogi (n) = częstotliwość w dziedzinie czasu (f) / prędkość (v)

pozwala doprowadzić funkcje transmitancji do postaci, która jest kompatybilna z transformatą Fouriera. Funkcje filtrów składają się z 4096 próbek.

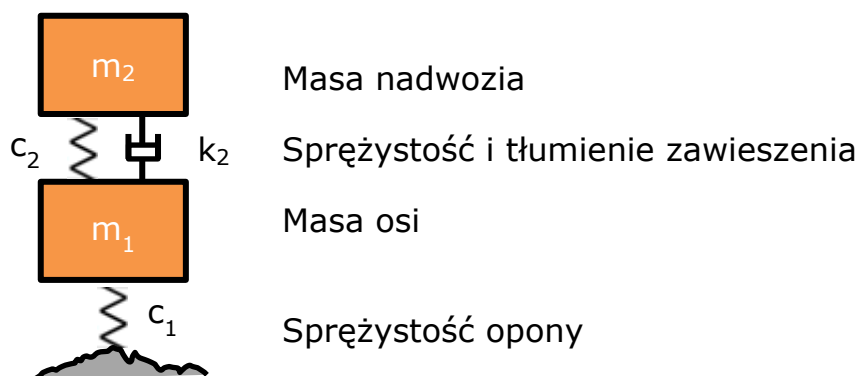
4.1.3.8 Dane filtra oddziaływania opony na drogę (R)

Filtr R bazuje na dwumasowym oscylatorze drgającym pionowo. Dokładniej: symulowana jest jedna oś pojazdu ciężarowego. Wynikowa funkcja transmitancji układu pokazana jest na rysunku 14.

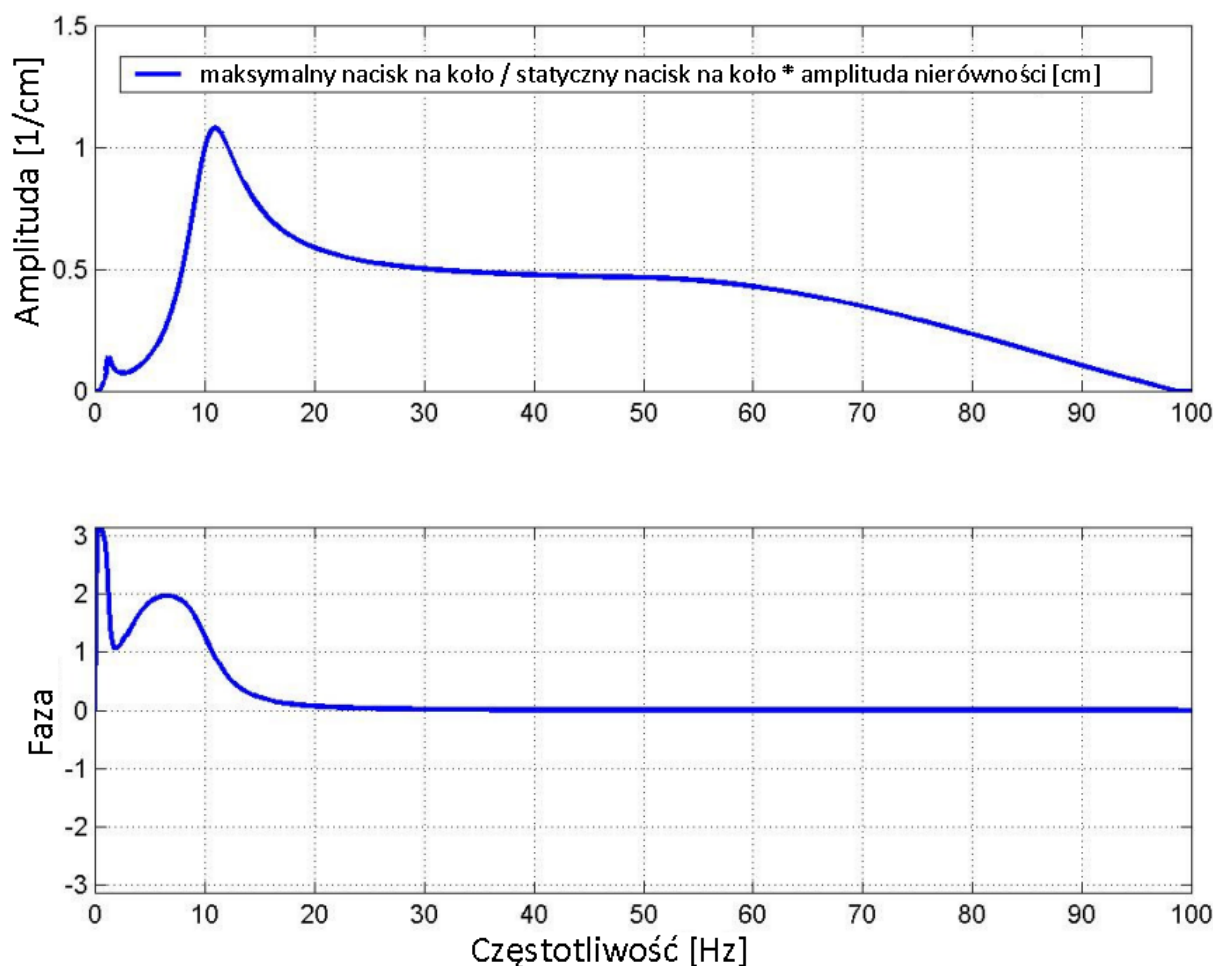
Tablica 2: Wielkości związane z wyliczeniem filtra R

Masa osi m_1 :	1300 kg
Masa nadwozia m_2 :	10200 kg
Częstotliwość własna osi v_1	10,5 Hz
Częstotliwość własna nadwozia v_2 :	1,21 Hz

Współczynnik tłumienia D_2 :	0,23
--------------------------------	------



Rysunek 13: Układ dwumasowy



Rysunek 14: Funkcja transmitancji filtra R (oddziaływanie opony na nawierzchnię)

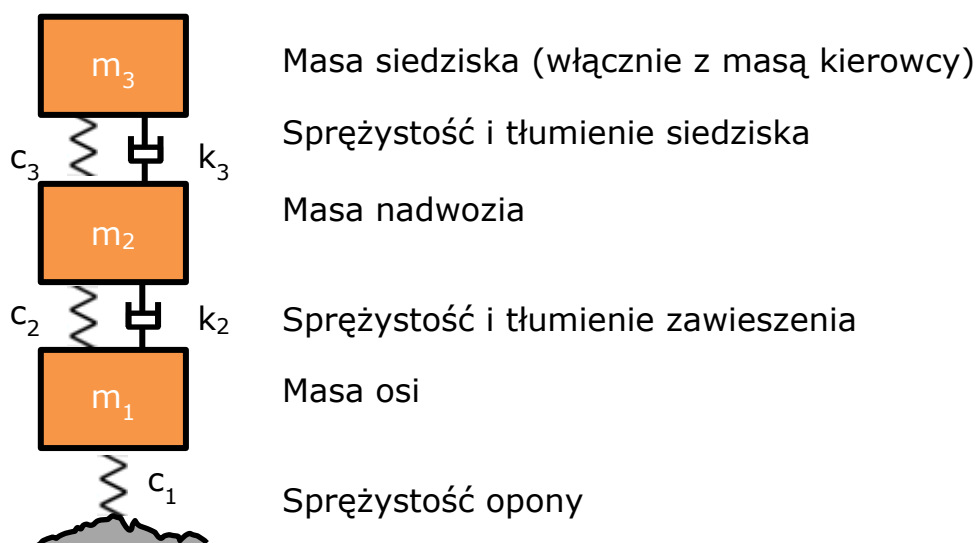
4.1.3.9 Dane dla filtra kierowcy pojazdu osobowego (M)

Filtr kierowcy pojazdu osobowego bazuje na trójmasowym oscylatorze drgającym pionowo i pomiarze pionowego przyspieszenia. Przyspieszenia są ograniczone do

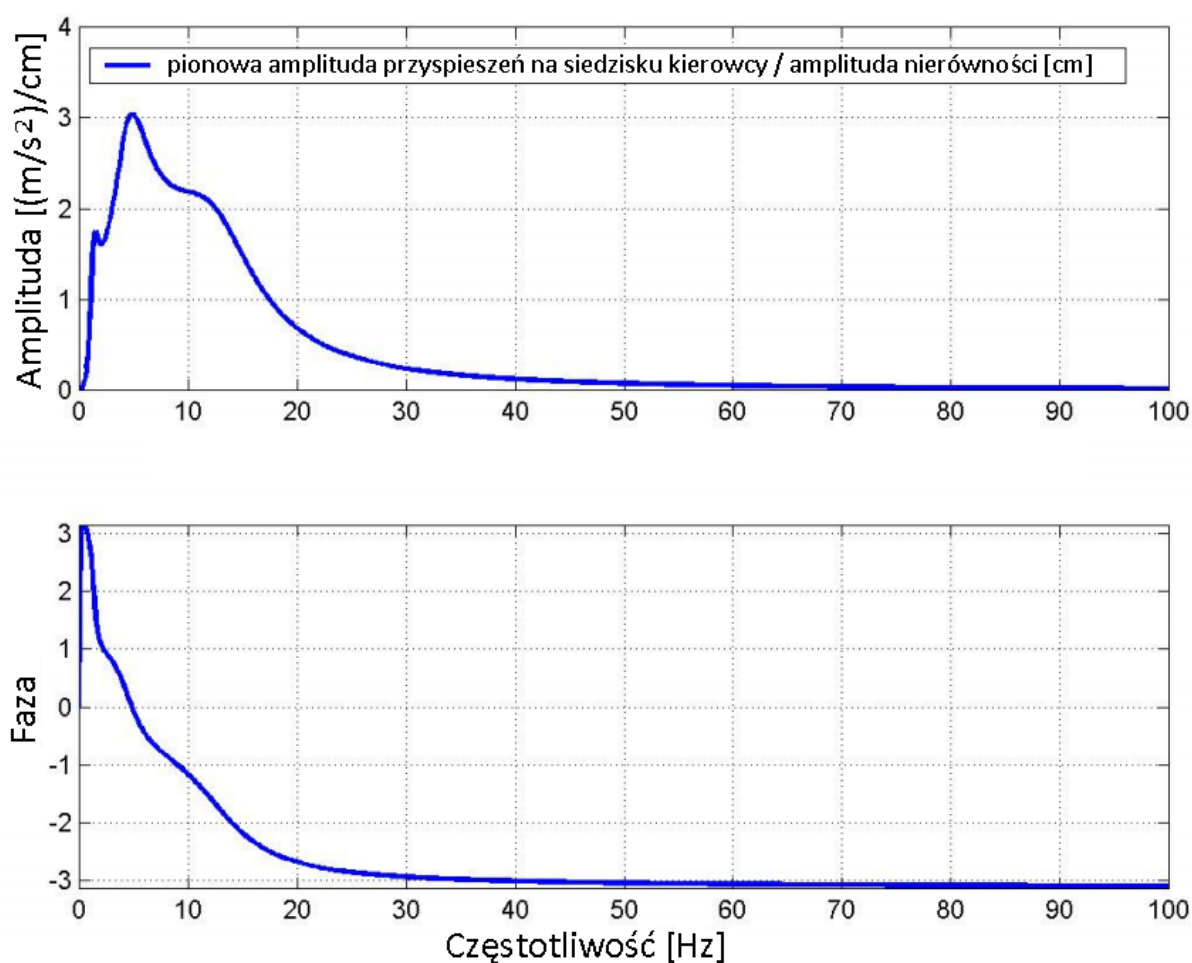
zakresu częstotliwości, dla których stwierdzone jest negatywne oddziaływanie na ludzi (wg. norm [DOK3] i [DOK4]).

Tablica 3: Wielkości związane z wyliczeniem filtra M

Masa $\frac{1}{4}$ osi m_1 :	40 kg
Masa $\frac{1}{4}$ nadwozia m_2 :	400 kg
Masa $\frac{1}{2}$ kierowcy na siedzisku m_3 :	28 kg (odpowiednik dla osoby o masie 74 kg)
Częstotliwość własna koła ν_1	13,5 Hz
Częstotliwość własna nadwozia ν_2 :	1,35 Hz
Częstotliwość własna siedziska ν_3 :	4,5 Hz
Współczynnik tłumienia nadwozia D_2 :	0,3
Współczynnik tłumienia siedziska D_3 :	0,35



Rysunek 15: Układ trójmasowy



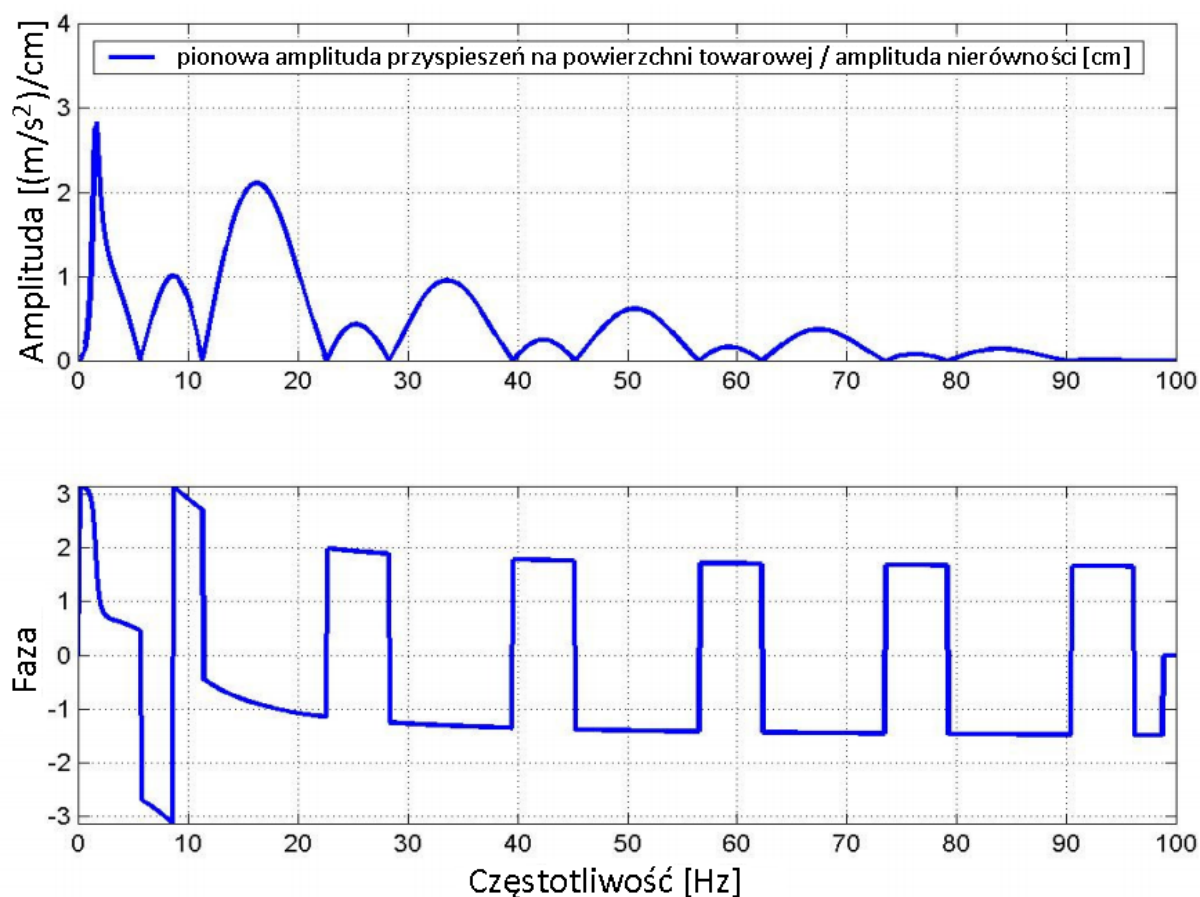
Rysunek 16: Funkcja transmitancji filtra M (pojazd osobowy-siedzisko-kierowca)

4.1.3.10 Dla filtra ładunku (L)

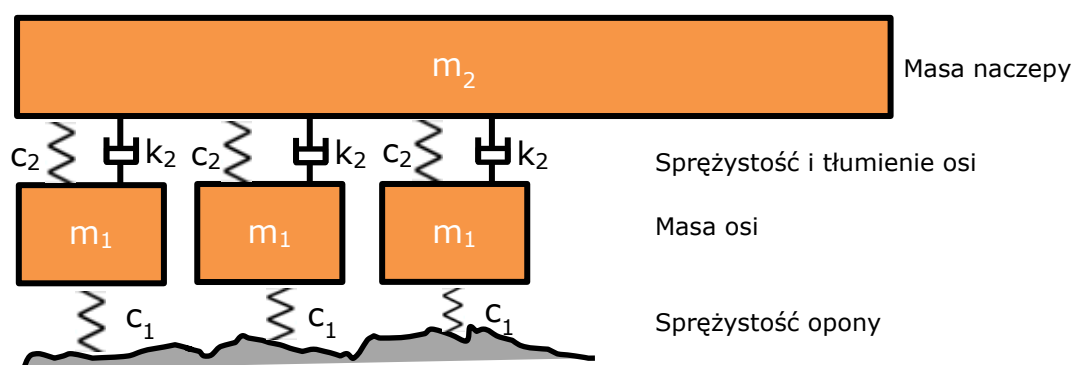
Filtr dla naczepy towarowej bazuje na czteromasowym oscylatorze, który symuluje przeciążenia na powierzchni ładunkowej trójosiowej naczepy ciągnika siodłowego bezpośrednio nad jej środkową osią. Na rysunku 17 pokazano wynikową funkcję transmitancji układu.

Tablica 4: Wielkości związane z wyliczeniem filtra R

Masa osi m_1 :	375 kg
Masa nadwozia m_2 :	10875 kg
Częstotliwość własna nadwozia ν_2 :	1,8 Hz
Sztywność opony c_1 :	1100 kN/m
Stała tłumienia k_2 :	24 kN s/m (współczynnik tłumienia 0,17)
Odstęp osi I_A	1,31 m



Rysunek 17: Funkcja transmitancji filtra L (naczepa towarowa)



Rysunek 18: Układ czteromasowy

Użyte równania:

$$c_2 = (m_2 + m_3)(2\pi v_2)^2$$

$$c_1 = m_1(2\pi v_1)^2 - c_2$$

$$c_3 = m_3(2\pi v_3)^2$$

$$k_2 = 2D_2\sqrt{c_2(m_2 + m_3)}$$

$$k_3 = 2D_3\sqrt{c_3m_3}$$

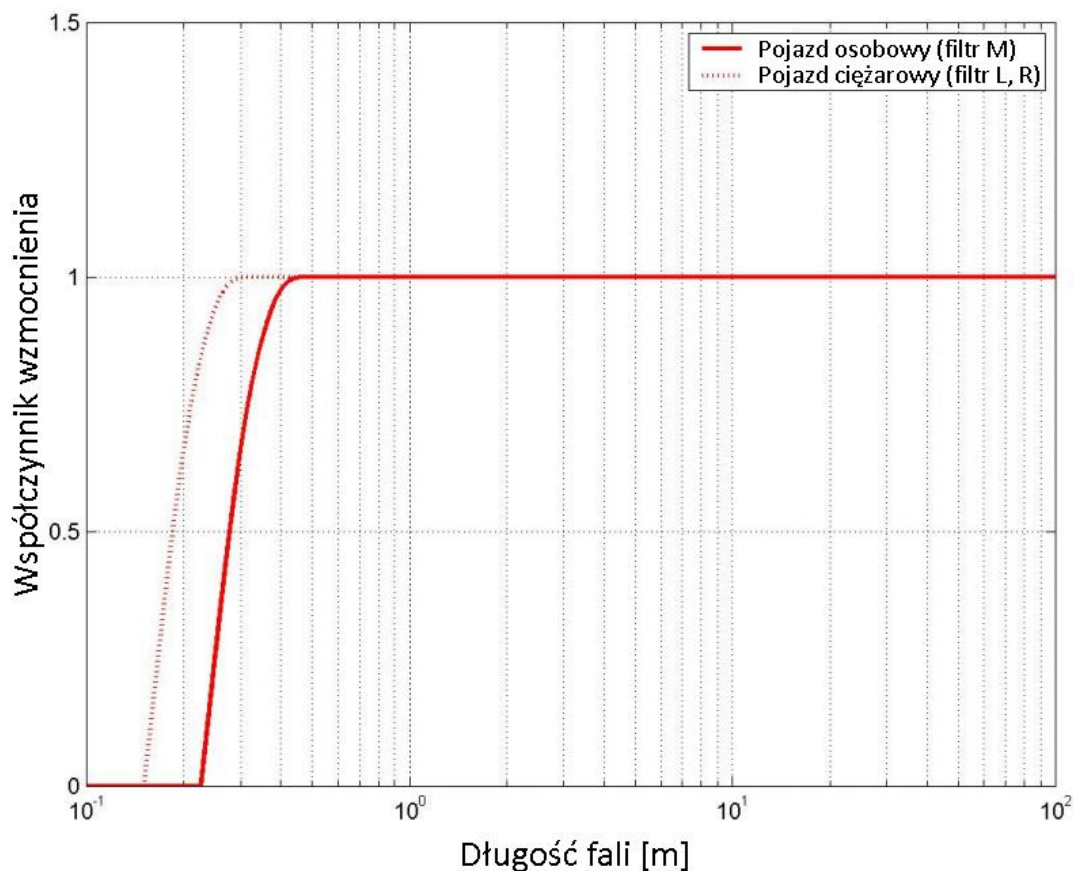
4.1.3.11 Efekt filtrowania przez sprężystość opony

Efekt filtrowania przez sprężystość opony (uwzględniony we wszystkich trzech filtrach) został dodany przez użycie filtra górnoprzepustowego, całkowicie wykluczającego fale o długościach poniżej 18 cm (filtr M) oraz 22,5 cm (filtry R i L) oraz całkowicie przepuszczającego fale o długościach powyżej 30 cm (filtr M) lub 45 cm (filtry R i L). Filtr górnoprzepustowy określony jest przez następującą funkcję:

$$F(L) = \frac{1 + 2 \cos(\alpha)}{3}$$

gdzie $\alpha = 2\pi \left(\frac{0,15 \text{ m}}{L} - \frac{1}{2} \right)$ dla filtra M lub $\alpha = 2\pi \left(\frac{0,15 \text{ m}}{L} - \frac{1}{3} \right)$ dla filtrów R i L.

Efekt ten został przedstawiony na rysunku 19.



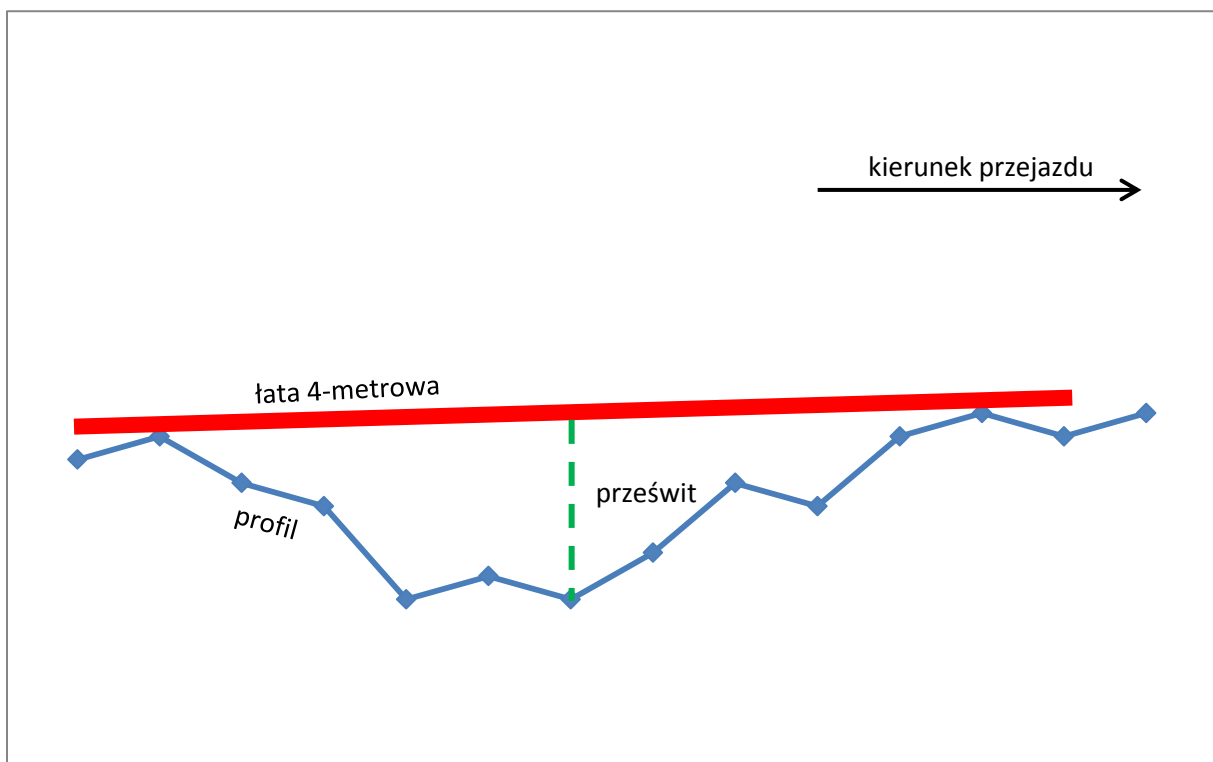
Rysunek 19: Ilustracja efektu filtrowania przez sprężystość opony

4.1.4 PGR_AVG i PGR_MAX – symulacja planografu

Parametry równości podłużnej PGR_AVG i PGR_MAX odzwierciedlają pomiar prześwitu pod łątą czterometrową.

Podstawą wyliczenia ich wielkości jest profil podłużny nierówności zapisany w sieciowych danych elementarnych dla danego odcinka diagnostycznego, rozszerzonego równomiernie z obu stron za pomocą danych z sąsiadujących odcinków, bądź danych rozbiegowych i pobiegowych. Rozszerzenie następuje tak, aby można było obliczyć prześwit pod łątą w każdym z punktów profilu odcinka diagnostycznego:

- dla każdego punktu profilu odcinka diagnostycznego oblicza się prześwit pod 4 metrową łątą położoną centralnie nad tym punktem,
- dla takiego położenia łąty należy wyznaczyć 2 punkty podparcia łąty oraz obliczyć prześwit pomiędzy łątą a profilem,
- z ciągu prześwitów obliczonych dla całego odcinka diagnostycznego oblicza się maksimum (PGR_MAX) i średnią (PGR_AVG).



Rysunek 20: Schematyczna ilustracja obliczania prześwitu dla parametrów PGR_MAX i PGR_AVG

4.2 Równość poprzeczna

4.2.1 GK – Średnia głębokość koleiny

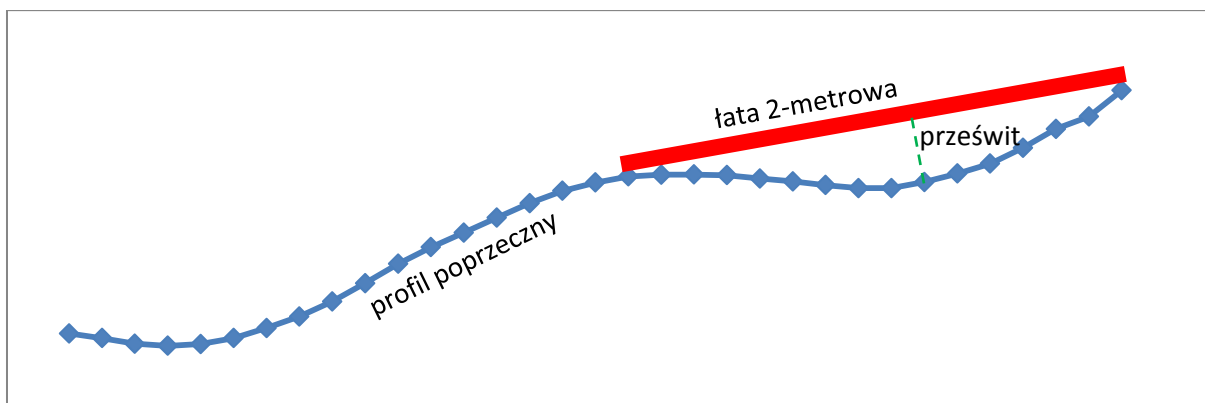
Głębokość koleiny oblicza się przez symulację przyłożenia łąty dwumetrowej do profilu poprzecznych nierówności.

Podstawą obliczeń jest profil poprzeczny nierówności zapisany dla danego metra bieżącego pomiaru w metrowym rekordzie danych elementarnych. Dla każdego profilu poprzecznego oblicza się głębokość lewej i prawej koleiny jako największy prześwit pod łątą. Prawa koleina odpowiada prześwitom uzyskanym przy zastosowaniu łąty o środku umieszczonym na prawo od linii odniesienia (umiejscowionej centralnie pomiędzy śladami kół), lewa koleina – na lewo (rysunek 21). Określenia „prawa” i „lewa” odnoszą się tutaj do kierunku przejazdu pojazdu pomiarowego.

Uśredniając wielkości prześwitów na odcinku diagnostycznym otrzymujemy dwa parametry:

- **GK_L** – średnią głębokość koleiny lewej, oraz
- **GK_P** – średnią głębokość koleiny prawej.

GK jest obliczane jako maksimum tych dwóch wartości na odcinku diagnostycznym.



Rysunek 21: Schematyczna ilustracja obliczania prześwitu pod łątą 2-metrową dla parametru GK – koleina prawa; GK_P

4.2.2 GW – Średnia teoretyczna głębokość wody w koleinie

Średnią teoretyczną głębokość wody w koleinie oblicza się przez symulację zbierania się wody na podstawie geometrii profili poprzecznych.

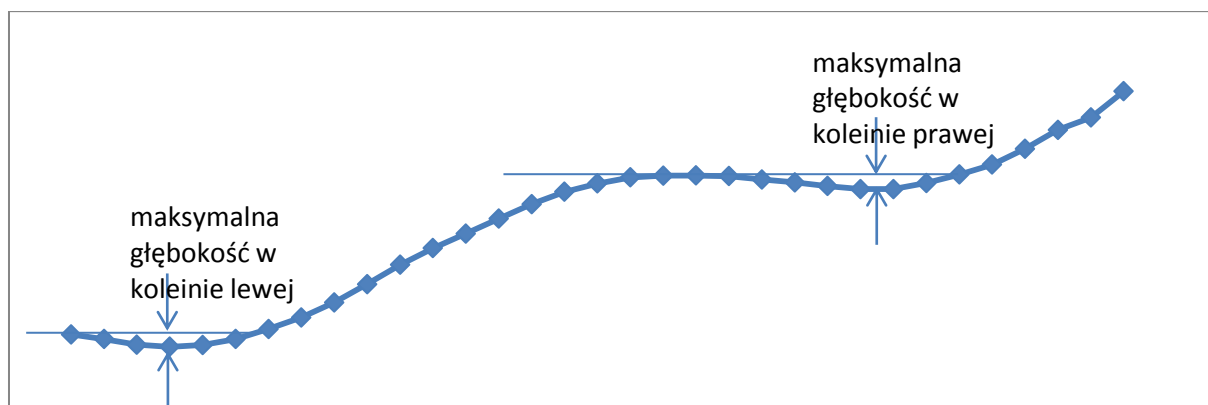
Dla każdego profilu poprzecznego zapisanego dla danego metra w rekordzie metrowym, oblicza się w każdym punkcie głębokość wody. Następnie określa się maksymalną głębokość dla prawej i lewej strony, gdzie granicą pomiędzy prawą

i lewą stroną jest centralnie położona linia odniesienia (pomiędzy śladami kół). Określenia „prawa” i „lewa” odnoszą się tutaj do kierunku przejazdu.

Uśredniając maksymalne głębokości na odcinku diagnostycznym otrzymujemy dwa parametry:

- **GW_L** – średnią teoretyczną głębokość wody w koleinie lewej oraz
- **GW_P** – średnią teoretyczną głębokość wody w koleinie prawej.

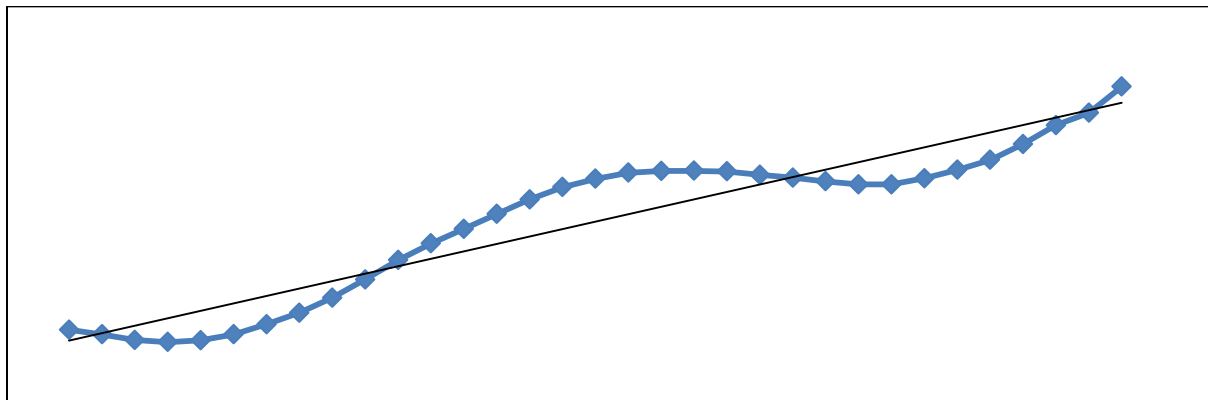
GW jest obliczane jako maksimum tych dwóch wartości na odcinku diagnostycznym.



Rysunek 22: Schematyczna ilustracja obliczania maksymalnych głębokości wody dla pojedynczego profilu poprzecznego

4.2.3 PP – Pochylenie poprzeczne

Pochylenie poprzeczne jest obliczane jako nachylenie prostej regresji dopasowanej do punktów wyznaczających profil poprzeczny względem poziomej linii odniesienia. Dla pochylenia w prawą stronę przyjmuje się wartości **dodatnie**. Określenie „prawa” odnosi się tutaj do kierunku narastania pikietażu. Pochylenie poprzeczne obliczane jest w procentach.



Rysunek 23: Schematyczna ilustracja obliczania pochylenia poprzecznego

4.3 Współczynnik tarcia

Za wielkość współczynnika tarcia dla odcinka diagnostycznego przyjmuje się wartość zmierzoną w obrębie danego odcinka diagnostycznego zapisaną w danych elementarnych (wartość WT dla rekordu, dla którego odległość od ostatnio wykonanego pomiaru wynosi zero).

W przypadku, gdy na dany odcinek diagnostyczny przypadły dwa pomiary lub więcej, przyjmuje się ich średnią arytmetyczną.

W przypadku, gdy na dany odcinek diagnostyczny nie przypadł żaden pomiar, przyjmuje się najbliższy pomiar wykonany przed tym odcinkiem, o ile został wykonany nie dalej niż 25 metrów przed początkiem odcinka (patrzac w **kierunku przejazdu**). W danych elementarnych oznacza to wartość zapisaną w metrowym rekordzie razem z odległością od ostatnio wykonanego pomiaru nie większą niż 25 metrów.

4.4 Makrotekstura

Wielkość średniej głębokości makrotekstury MTD (ang. *mean texture depth*) zapisana w danych wynikowych dla odcinka diagnostycznego jest średnią arytmetyczną wartości metrowych MTD zapisanych w danych elementarnych w obrębie tego odcinka.

4.5 Cechy powierzchniowe

4.5.1 Ustalenie rodzaju nawierzchni

Na etapie obliczania wielkości stanu dla cech powierzchniowych należy ustalić rodzaj nawierzchni (bitumiczna, betonowa, innego rodzaju), dominujący na odcinku diagnostycznym. Jako dominujący uznaje się rodzaj dla większej liczby metrowych rekordów na odcinku diagnostycznym. W przypadku jednakowej liczby wystąpień nawierzchni dwóch rodzajów przyjmuje się pierwszeństwo nawierzchni bitumicznej przed betonową i betonowej przed nawierzchnią innego rodzaju.

4.5.2 Parametry nawierzchni bitumicznych

Dla parametrów nawierzchni bitumicznych identyfikacja opiera się na przypisaniu segmentom siatki (1m x 1/3 szerokości pasa ruchu) jedynek (cecha występuje) lub spacji (cecha nie występuje).

Wielkość stanu dla wszystkich parametrów nawierzchni bitumicznych (**SSP, LA, LA_W, LA_N, WYB, NST, NL**) jest procentowym udziałem segmentów

oznaczonych jedynekami na danym odcinku. Obliczana jest przez podzielenie liczby segmentów „1” przez liczbę wszystkich segmentów przypisanych w metrowych rekordach do danego odcinka diagnostycznego.

4.5.3 Parametry nawierzchni betonowych

Dla parametrów nawierzchni betonowych identyfikacja odbywa się przez przypisanie informacji do poszczególnych płyt.

Wielkości stanu oblicza się:

- dla parametrów **P_SD, UN_LU, UK_DU** – określających średni stopień uszkodzenia w ramach **uszkodzonych** płyt oblicza się średnią z zapisanych dla płyt na danym odcinku diagnostycznym zidentyfikowanych wielkości **P, UN, UK**. Bierze się przy tym jedynie płyty, na których odpowiednie uszkodzenie występuje,
- dla parametrów **P_PU, UN_PU, UK_PU, WYB_B, LA_B** – określających odsetek uszkodzonych płyt – dzieli się ilość płyt z zaznaczonym danym uszkodzeniem przez liczbę płyt przypadającą na dany odcinek. Za liczbę płyt przyjmuje się iloraz długości odcinka diagnostycznego i średnią z długości płyt zapisanych w metrowych rekordach danych elementarnych.

4.6 Ugięcia

W ramach obliczenia wielkości stanu dla ugięć wyznaczyć należy ugięcie maksymalne D i wskaźnik krzywizny ugięcia SCI dla danego odcinka diagnostycznego.

Poniżej opisany jest sposób wyznaczenia D dla danego odcinka diagnostycznego, SCI wyznacza się analogicznie.

Za wielkość ugięcia maksymalnego dla odcinka diagnostycznego przyjmuje się wartość zmierzoną w obrębie danego odcinka diagnostycznego zapisaną w danych elementarnych (wartość D dla rekordu, dla którego odległość od ostatnio wykonanego pomiaru wynosi zero).

W przypadku, gdy na dany odcinek diagnostyczny przypadły dwa pomiary lub więcej, przyjmuje się ich średnią.

W przypadku, gdy na dany odcinek diagnostyczny nie przypadł żaden pomiar, przyjmuje się najbliższy pomiar wykonany przed tym odcinkiem, o ile został wykonany nie dalej niż 25 metrów przed początkiem odcinka (patrząc w **kierunku przejazdu**). W danych elementarnych oznacza to wartość zapisaną

w metrowym rekordzie razem z odległością od ostatnio wykonanego pomiaru nie większą niż 25 metrów.

Spis ilustracji

Rysunek 1: Schemat przebiegu procesu projekcji geograficznych danych elementarnych na sieć i obliczania wielkości stanu	7
Rysunek 2: Schemat przebiegu procedury projekcji	11
Rysunek 3: Poglądowa ilustracja etapu wyznaczenia przejechanej ścieżki na modelu sieci – punkty pomiarowe są oznaczone niebieskim kolorem	13
Rysunek 4: Ilustracja rzutu prostopadłego punktów pomiarowych na łamane modelu sieci, czerwone punkty oznaczają lokalizacje punktów pomiarowych	15
Rysunek 5: Punkty pomiarowe rzutowane są wyłącznie na odcinki należące do listy odwiedzonych odcinków sieciowych	15
Rysunek 6: Rzutowanie niektórych punktów pomiarowych nie jest rzutem prostopadłym sensu stricto	16
Rysunek 7: Ilustracja przypisania punktów pomiarowych do modelu sieci, czerwone punkty oznaczają lokalizacje punktów pomiarowych, zielone - ich lokalizacje po przypisaniu do modelu sieci	17
Rysunek 8: Przejazd pomiarowy (czerwone punkty)	18
Rysunek 9: Schematyczna ilustracja rozdzielania danych elementarnych pomiędzy odcinki diagnostyczne	19
Rysunek 10: Przebieg obliczenia gęstości spektralnej AUN	24
Rysunek 11: Wykres funkcji okna CDTW	25
Rysunek 12: Schemat obliczania wielkości LWI	30
Rysunek 13: Układ dwumasowy	33
Rysunek 14: Funkcja transmitancji filtra R (oddziaływanie opony na nawierzchnię)	33
Rysunek 15: Układ trójmasowy	34
Rysunek 16: Funkcja transmitancji filtra M (pojazd osobowy-siedzisko-kierowca)	35
Rysunek 17: Funkcja transmitancji filtra L (naczepa towarowa)	36
Rysunek 18: Układ czteromasowy	36
Rysunek 19: Ilustracja efektu filtrowania przez sprężystość opony	37

Rysunek 20: Schematyczna ilustracja obliczania prześwitu dla parametrów PGR_MAX i PGR_AVG	38
Rysunek 21: Schematyczna ilustracja obliczania prześwitu pod łąką 2-metrową dla parametru GK – koleina prawa; GK_P	39
Rysunek 22: Schematyczna ilustracja obliczania maksymalnych głębokości wody dla pojedynczego profilu poprzecznego.....	40
Rysunek 23: Schematyczna ilustracja obliczania pochylenia poprzecznego	40

Spis tablic

Tablica 1: Symbole użyte przy obliczaniu AUN	20
Tablica 2: Wielkości związane z wyliczeniem filtra R.....	32
Tablica 3: Wielkości związane z wyliczeniem filtra M	34
Tablica 4: Wielkości związane z wyliczeniem filtra R.....	35