

**Andrzej SOWA**

Politechnika Krakowska, Kraków

## **WYKORZYSTANIE KRZYWYCH ZUŻYCIA W KONSTRUKCJI WEKTORA STANU TECHNICZNEGO OBIEKTU DIAGNOSTYKI**

### **Słowa kluczowe**

Eksploatacja techniczna, krzywe zużycia, diagnostyka techniczna, stan techniczny, parametry diagnostyczne, wektor stanu technicznego.

### **Streszczenie**

Praca dotyczy problemu interpretacji zmian parametrów diagnostycznych, które mogą być opisane krzywymi zużycia, podczas identyfikacji stanu technicznego elementów pojazdów. W artykule przedstawiono szczegółową definicję formalną klasycznej krzywej zużycia, uwzględniającą warunek równości pochodnych na końcach przyległych obszarów, przez które ona przebiega. Podano również przykład wektorowej interpretacji stanu technicznego zestawu kołowego pojazdu szynowego w przypadku uwzględnienia dwu parametrów diagnostycznych – grubości obręczy i grubości obrzeża koła.

### **Wprowadzenie**

Nieuchronnym efektem eksploatacji każdego obiektu technicznego jest występowanie procesów zużycia jego elementów. Wśród tych obiektów szczególnie złożoną strukturą cechują się pojazdy szynowe. Są to obiekty składające się z całego szeregu różnego rodzaju układów: mechanicznych, pneumatycznych,

hydraulicznych, elektrycznych, elektronicznych. Każdy z nich ma charakterystyczne formy zużycia, a ich wielkość może być określana mierzalnymi lub opisowymi cechami. W przypadku tych form zużycia, które są oceniane cechami mierzalnymi, zmiany ich wartości może opisywać pewna krzywa – krzywa zużycia. Dla systemu kierowania eksploatacją pojazdów istotne jest zdefiniowanie zakresu dopuszczalnych zmian wartości tych cech, ponieważ każdy punkt usytuowany na krzywych zużycia może być utożsamiany z pewnym stanem technicznym określonego elementu. W pojazdach szynowych podobnie jak i we wszystkich złożonych obiektach występuje szereg elementów, których stan określa kilka cech jednocześnie. W takiej sytuacji użycie pojęcia wektora stanu technicznego ułatwia zbiorowe ujęcie procesów zużycia takich elementów. Przykład możliwości zastosowania wektora stanu technicznego w diagnostyce zestawów kołowych pojazdu szynowego jest celem niniejszej pracy.

## 1. Krzywe zużycia i ich opis formalny

Każdy obiekt techniczny w procesie projektowania i wytwarzania części, a następnie podczas ich montażu uzyskuje właściwości, które można opisać pewnym zbiorem cech fizykalnych. Cechy te nazywane są niekiedy parametrami struktury wewnętrznej [2] lub parametrami stanu [4]. Wartości tych cech mogą w trakcie eksploatacji ulegać zmianie – najczęściej pogorszeniu – na skutek występowania procesów zużycia. Efektem tych procesów jest zużycie, czyli „trwałe, niepożądane zmiany stanu elementu, zachodzące podczas eksploatacji w sposób ciągły, skokowy lub kumulujący się, w wyniku czego okres spełniania przez element określonej funkcji użytkowej ustawicznie wyczerpuje się” [3].

Zmiany w elementach obiektu, zachodzące podczas eksploatacji, mogą dotyczyć ich warstwy wierzchniej lub całej masy i zwykle mogą być opisane cechami stanu [1], których wartości są funkcjami:

$$x_i = x_i[f_{i,a}(t)] \quad (1)$$

gdzie:

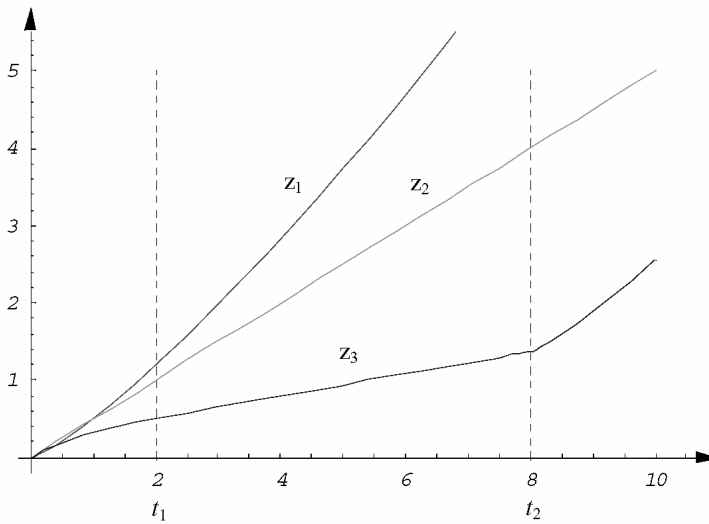
$x_i$  –  $i$ -ta cecha stanu,

$f_{i,a}$  – funkcja odwzorowująca dla cechy  $x_i$  w warunkach  $a$ ,

$t$  – czas eksploatacji.

Cechy te odnoszą się do struktury wewnętrznej [2] obiektu diagnostyki. Dla wielu mierzalnych cech ich zmiany mogą być przedstawione w formie graficznej, w postaci krzywej zużycia. W literaturze, między innymi w [3] rozróżnia się trzy typy krzywych zużycia (rys. 1):

- klasyczną (krzywa Lorentza),
- proporcjonalną,
- progresywną.



Rys. 1. Krzywe zużycia dla danych testowych:  $z_1$  – progresywna,  $z_2$  – proporcjonalna,  $z_3$  – klasyczna (Lorenza)

Progresywna krzywa zużycia ( $z_1$ ) dotyczy takich elementów, których eksploatacja odbywa się za wszelką cenę, w obiektach jednorazowego użytku. Dotyczyć to może urządzeń specjalnego przeznaczenia i w normalnej eksploatacji ten rodzaj charakterystyki zużycia jest niedopuszczalny. Krzywą zużycia dla tego przypadku wyraża się wzorem przedstawionym w [3]:

$$z_1 = f \cdot t^g \quad (2)$$

w którym:

- $t$  – czas pracy,
- $f$  – współczynnik proporcjonalności,
- $g$  – współczynnik progresji.

Krzywa zużycia proporcjonalnego ( $z_2$ ) dotyczy takich przypadków, w których zużycie postępuje równomiernie od samego początku eksploatacji – jest proporcjonalne do okresu jej trwania. Dotyczy to zwłaszcza elementów narażonych na zużycie ścierne (wstawki hamulcowe, okładziny sprzęgieł). Wielkość zużycia w tym przypadku jest określona wzorem zawartym w [3]:

$$z_2 = k \cdot t \quad (3)$$

gdzie:

- $k$  – współczynnik proporcjonalności.

Z eksploatacyjnego punktu widzenia istotnym jest, aby zużycie tego typu nie przebiegało zbyt szybko, co ma miejsce wtedy, gdy notuje się małą wartość współczynnika proporcjonalności  $k$ .

Klasyczna krzywa zużycia (Lorenza) charakteryzuje się występowaniem wyraźnych trzech okresów, w których zmienia się intensywność zużycia. Pierwszy okres, w którym obserwuje się początkową dużą, ale zmniejszającą się intensywność zużycia, jest charakterystyczny dla procesu docierania elementów. Przebieg krzywej zużycia w tym okresie ( $0 \leq t \leq t_1$ ) ma charakter degresywny jako krzywa logarytmiczna. Z kolei następuje okres zużycia o stałej intensywności (liniowy), typowy dla normalnej eksploatacji ( $t_1 < t \leq t_2$ ). Dla długości tego okresu istotnym jest, aby współczynnik proporcjonalności  $d$  posiadał małą wartość. W trzecim okresie ( $t_2 < t$ ) intensywność zużycia rośnie, co może być powodowane zwiększającymi się luzami czy zmianą właściwości warstwy wierzchniej elementów. Ponieważ w tym zakresie krzywa zużycia ma charakter progresywny (krzywa wykładnicza) istnieje realne niebezpieczeństwo przejścia zużycia w uszkodzenie – zniszczenie.

Podawane w literaturze [3], ogólne zależności opisujące klasyczną krzywą zużycia są niewystarczające dla spełnienia warunków ciągłości i równości jej jednostronnych pochodnych na końcach przedziałów wyznaczonych przez czasy eksploatacji  $t_1$  i  $t_2$ . Warunki te zostaną spełnione, jeśli przebieg krzywej ( $z_3$ ) będzie zdefiniowany następująco:

$$z_3 = \begin{cases} a \cdot \ln(t+b) + c, & \text{gdy } 0 \leq t \leq t_1 \\ e + d \cdot (t-t_1), & \text{gdy } t_1 < t \leq t_2 \\ h - f \cdot t_{x2}^g + f \cdot (t-t_2+t_{x2})^g, & \text{gdy } t_2 < t \end{cases} \quad (4)$$

Współczynniki występujące we wzorze (4) są powiązane ze sobą w sposób następujący:

$$b = \text{Exp} \left[ \frac{-c}{a} \right] \quad (5)$$

$$d = \frac{a}{t_1 + b} \quad (6)$$

$$t_{x2} = \left( \frac{d}{f \cdot g} \right)^{\frac{1}{g-1}} \quad (7)$$

$$e = z_3(t_1) \quad (8)$$

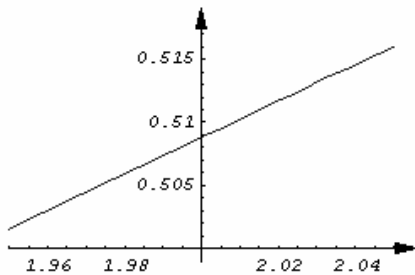
$$h = z_3(t_2) \quad (9)$$

Dla potwierdzenia słuszności wzorów (4)÷(9), na rys. 1 przedstawiono przebieg klasycznej krzywej zużycia sporządzonej dla przykładowych danych, tj. dla:

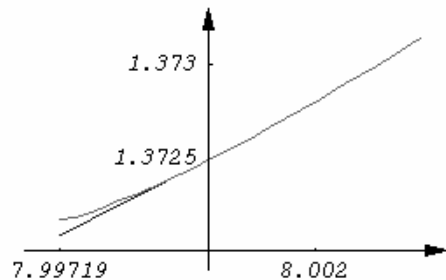
$$k = 0,5; f = 0,5; g = 1,25; a = 0,4; c = 0,1; t_1 = 2; t_2 = 8.$$

Rys. 2a i 2b pokazują przejścia klasycznej krzywej zużycia pomiędzy wyróżnionymi okresami eksploatacji obiektu. Pierwszy z nich obrazuje przejście z krzywej logarytmicznej w prostą. Przebieg wykresu, oprócz obliczeń, wskazuje na spełnienie warunku równości pochodnych po lewej i prawej stronie punktu  $t_1$ . Podobnie jest w przypadku przejścia prostej w krzywą wykładniczą. Dla podkreślenia faktu spełnienia tego warunku, na rys. 2b przedstawiono także przebieg krzywej wykładniczej w przedziale  $(t_{x2}, t_2)$ . Fragment ten należy do krzywej zużycia.

a)



b)



Rys. 2. Przebieg klasycznej krzywej zużycia w otoczeniu punktów: a)  $x = 2$ , b)  $x = 8$

Rzeczywiste krzywe zużycia sporządzone na podstawie pomiarów przeprowadzanych podczas eksploatacji mogą się nieco różnić od przedstawionych, teoretycznych, co może być spowodowane oddziaływaniem zmiennych warunków obciążenia i eksploatacji, a niekiedy także uszkodzeniami powstałymi podczas operacji demontażu i montażu elementów, czy metodami odnowy (np. zmniejszeniem wymiarów poprzez obróbkę wiórową). W każdym jednak przypadku realnym problemem jest ustalenie granic dopuszczalnych zmian cech stanu, które mogą być opisane krzywymi zużycia i które podlegają ocenie w trakcie badań diagnostycznych. Dotyczy to zwłaszcza progresywnej i liniowej krzywej zużycia. W przypadku klasycznej krzywej problem jest w zasadzie rozwiązany, ponieważ chwila  $t_2$  (rys. 1) przesądza o kresie eksploatacji obiektu.

## 2. Stan techniczny obiektu diagnostyki

Pojęcie stanu technicznego ma istotne znaczenie dla diagnostyki technicznej, będącej jednym z ważnych elementów systemu kierowania eksploatacją

techniczną pojazdów. Najważniejszym zadaniem diagnostyki technicznej jest rozpoznawanie stanu technicznego obiektu w określonych chwilach jego cyklu życia.

Stan techniczny jest własnością obiektu diagnozowanego determinowaną przez wektor cech struktury wewnętrznej (cech stanu), czyli:

$$\mathbf{X}(t,a) = [x_1[f_{1,a}(t)], x_2[f_{2,a}(t)], \dots, x_n[f_{n,a}(t)]] \quad (10)$$

gdzie:

$\mathbf{X}(t,a)$  – wektor stanu technicznego po okresie eksploatacji  $t$  w warunkach  $a$ .

Tak więc stan techniczny jest obiektywnym, ilościowym atrybutem każdego obiektu, atrybutem, który może ulegać ciągłym zmianom w całym okresie eksploatacji, tj. od momentu wyprodukowania do złomowania. Z warunku ciągłości zmian wartości cech struktury wewnętrznej wynika, że wektory  $\mathbf{X}(t,a)$  tworzą nieprzeliczalny zbiór, w którym należy określić pewne granice obszarów utożsamianych z określonymi klasami stanów technicznych.

W przeważającej liczbie przypadków zmierzenie wartości cech struktury wewnętrznej jest niemożliwe bez całkowitego demontażu złożonych zespołów pojazdu, dlatego w badaniach diagnostycznych wykorzystuje się także inne cechy, które mogą w sposób pośredni identyfikować stan techniczny. Cechy te nazywa się wyjściowymi [2, 4] i dzieli na robocze, odnoszące się do istotnych funkcji realizowanych przez poszczególne zespoły pojazdu oraz cechy towarzyszące, będące efektem wtórnym działania tych zespołów.

W efekcie końcowym, do diagnostyki technicznej wykorzystuje się takie podzbiory cech procesów roboczych i towarzyszących oraz cech struktury wewnętrznej, które przy minimum kosztów pozwalają na identyfikację stanu technicznego pojazdu. Przyjmując wspólne oznaczenie dla wszystkich grup cech, wektor cech diagnostycznych  $\mathbf{Y}(t,a)$  możemy zapisać w następujący sposób:

$$\mathbf{Y}(t,a) = [y_1[\varphi_{1,a}(t)], y_2[\varphi_{2,a}(t)], \dots, y_p[\varphi_{p,a}(t)]] \quad (11)$$

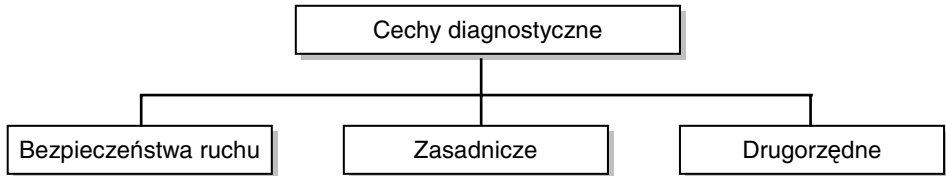
gdzie:

$y_1, \dots, y_p$  – wybrane cechy diagnostyczne obiektu,

$\varphi_{p,a}$  – funkcja odwzorowująca dla cechy  $y_p$  w warunkach  $a$ .

Sprawdzenie wartości takich reprezentatywnych cech diagnostycznych umożliwia zaliczenie obiektu diagnostyki do odpowiedniej klasy stanów technicznych, ale wtedy, gdy wcześniej zostaną określone współzależności pomiędzy wartościami granicznymi cech i klas stanów technicznych.

Jeśli jako przykład obiektu diagnostyki przyjmiemy pojazd szynowy, to ich istniejący w praktyce system eksploatacji uprawnia do dokonania podziału ogółu cech diagnostycznych na trzy zbiory (rys. 3): zbiór parametrów bezpieczeństwa ruchu (wektor  $\mathbf{Y}_b$ ) [5] oraz zbiory parametrów [2], które charakteryzują zasadnicze (wektor  $\mathbf{Y}_z$ ) i pomocnicze funkcje wypełniane przez pojazd (wektor  $\mathbf{Y}_d$ ).



Rys. 3. Podział parametrów diagnostycznych

Wartości graniczne cech bezpieczeństwa są przedmiotem specjalnych uregulowań przyjmowanych przez wszystkich użytkowników pojazdów i posiadają moc prawną. Dla pozostałych cech wartości graniczne nie są w ten sposób określone. Jeśli istnieją pewne wartości graniczne cech zasadniczych i drugorzędnych, to ich przekroczenie nie musi się wiązać z natychmiastowym wycofaniem pojazdu z ruchu. Użytkownik posiada pewien margines swobody w określaniu chwili przekazania pojazdu do systemu obsługi. Niejednokrotnie może to być jednak powodem nadmiernego zużycia lub uszkodzenia określonych podzespołów pojazdu.

Szersze uzasadnienie potrzeby wyróżnienia zbioru cech bezpieczeństwa, a także również definicje klas stanów przypisywanych ocenom wartości tych cech, jak również ocenom cech zasadniczych i drugorzędnych przedstawiono w poz. [5, 6].

### 3. Przykład wykorzystania wektora stanu w ocenie zużycia elementów pojazdów szynowych

Jak już wspomniano, zastosowanie wektorowej reprezentacji stanu technicznego jest szczególnie użyteczne dla elementów obiektu diagnostyki, które na skutek występujących procesów zużycia wymagają łącznej oceny wartości zmierzonych kilku cech. Sytuacja taka ma miejsce podczas badań diagnostycznych zestawów kołowych pojazdów szynowych. W tabeli 1 przedstawiono wyniki pomiarów wartości dwu cech diagnostycznych koła lokomotywy elektrycznej. Pomiary te były prowadzone systematycznie przez służby zaplecza technicznego i dotyczyły między innymi:

- grubości obrzeża,
- grubości obręczy zestawu kołowego.

Tabela 1. Wyniki pomiarów wybranych parametrów koła lokomotywy elektrycznej

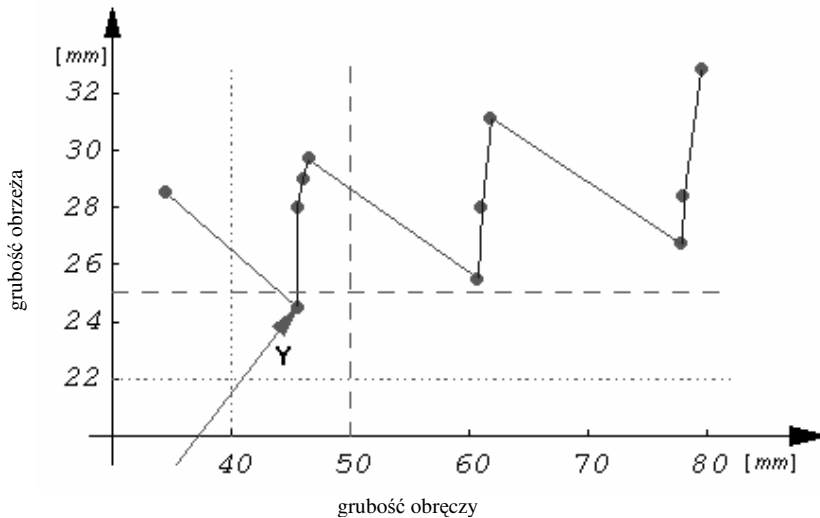
Lp.	Grubość [mm]		Uwagi
	obręczy „O”	obrzeża „Og”	
1	79,5	32,8	
2	78,0	28,4	
3	77,8	26,7	odtworzenie profilu
4	61,8	31,1	
5	61,0	28,0	
6	60,7	25,5	odtworzenie profilu
7	46,5	29,7	
8	46,0	29,0	
9	45,5	28,0	
10	45,5	24,5	odtworzenie profilu
11	34,5	28,5	

Dane w tabeli 1 ujmują zużycie koła lokomotywy powstające w sposób naturalny, w eksploatacji, jak również zmiany wymiarów na skutek konieczności odtwarzania profilu zarysu poprzez obróbkę wiórową. Zmiany tych cech, zachodzące w określonych warunkach eksploatacji, można przedstawić liniową krzywą zużycia, a każdy wynik uzyskany podczas pomiarów musi być indywidualnie brany pod uwagę podczas oceny kwalifikującej zestaw kołowy do odpowiedniej klasy stanu technicznego.

Na rys. 4 przedstawiono przebieg zmian grubości obrzeża i grubości obręczy, ich wartości graniczne oraz przykładowy wektor stanu technicznego  $Y$ . Linia przerywaną zaznaczono zakres wartości dopuszczalnych tych parametrów dla ruchu ekspresowego, a kropkowaną dla ruchu pasażerskiego.

Cechą decydującą o konieczności trwałego zmniejszenia prędkości dopuszczalnej lokomotywy (do momentu wymiany obręczy na nową) jest grubość obręczy. Po przekroczeniu wymiaru  $O = 40$  [mm] (linii pionowej punktowej) lokomotywa może być używana w dalszym ciągu w ruchu towarowym. Przekroczenie wartości granicznych oznaczonych liniami kreskowanymi jest przejściem pojazdu ze stanu zdatności do stanu zdatności warunkowej zdefiniowanym formalnie w [5], w którym następuje ograniczenie maksymalnej prędkości jazdy lokomotywy. Nie może ona być wykorzystana wtedy do prowadzenia pociągów ekspresowych.





Rys. 4. Przebieg zmian dwu cech diagnostycznych i przykładowy wektor ( $Y$ ) stanu technicznego zestawu kołowego

## Podsumowanie

Wektorowa interpretacja stanu technicznego może być stosowana również przy większej liczbie cech diagnostycznych i może dotyczyć zarówno całych obiektów, jak i jego poszczególnych elementów. Zmierzone wartości poszczególnych cech stanowią współrzędne wektora stanu technicznego w przestrzeni  $N$ -wymiarowej. Poza trudnościami związanymi z graficznym przedstawieniem takiego wektora nie zmienia to nic w sposobie interpretacji wyników pomiarów wykonanych w trakcie badań diagnostycznych.

Możliwość wykorzystania wektora stanu technicznego w procesie podejmowania decyzji eksploatacyjnych jest niezależna od rodzaju krzywych zużycia, którymi mogą być opisane ważne cechy diagnostyczne obiektu. Istotną różnicą pomiędzy cechami opisywanymi proporcjonalną i klasyczną krzywą zużycia jest sposób ustalania wartości granicznych tych cech. W przypadku krzywej klasycznej jest to wzrastająca intensywność zużycia (dla  $t > t_2$  jak na rys. 1), podczas gdy dla krzywej proporcjonalnej są to uwarunkowania wynikające ze współpracy z innym elementami (np. dla klocków hamulcowych możliwość uszkodzenia tarczy hamulcowej lub spadek skuteczności hamulca).

## Bibliografia

1. Cholewa W.: Wspomaganie procesu wnioskowania w diagnostyce technicznej. Materiały V Krajowej Konferencji Diagnostyka Techniczna Urządzeń i Systemów Diag' 2003, Ustroń 2003, 63–68.
2. Hebda M., Niziński S.: Pelc H.: Podstawy diagnostyki pojazdów mechanicznych. WKŁ, Warszawa 1980.
3. Magiera J., Piec P.: Ocena zużycia i niezawodności pojazdów szynowych. Ossolineum, Wrocław–Warszawa–Kraków 1994.
4. Niziński St.: Elementy eksploatacji obiektów technicznych. Wydawnictwo Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego, Olsztyn 2000.
5. Sowa A.: Klasyfikacja stanów technicznych dla systemu użytkowania pojazdów szynowych. Prace Naukowe Instytutu Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej nr 86, seria Konferencje 26, tom 2, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2002, 279–286.
6. Sowa A.: Klasyfikacja stanów w eksploatacji pojazdów szynowych. Czasopismo Techniczne, seria Mechanika, Politechnika Krakowska 2005, z. 3-M, 269–278.

Recenzent:

**Franciszek TOMASZEWSKI**

## **Wear curves used in construction of technical condition vectors of diagnostic objects**

### **Key words**

Technical operation, wear curve, technical diagnose, technical condition, diagnostic parameters, technical condition vector.

### **Summary**

The paper deals with an interpretation problem of diagnostic parameter changes during the identification of the technical condition of vehicle elements. These parameters may be characterized by wear curves. The paper presents a detail formal definition of a classical wear curve with equality condition of derivatives at the ends of adjacent areas crossed over by that curve. Vector interpretation of the technical condition of a vehicle wheel set in case when two diagnostic parameters, the rim thickness and the wheel edge thickness, were taken into consideration is shown as example.