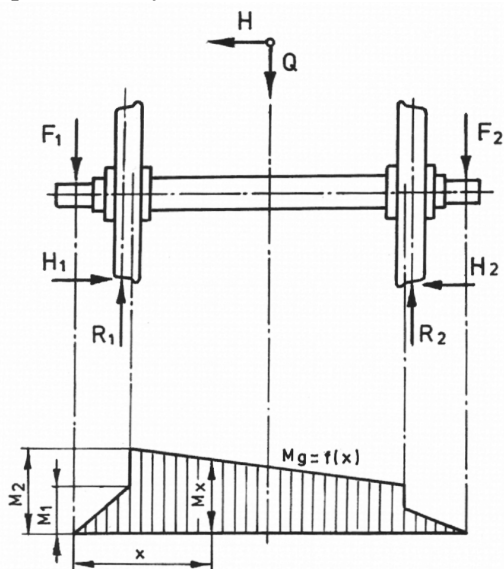


Badania korrugacji kół pojazdów szynowych

Artykuł zawiera wyniki badań korrugacji kół pojazdów szynowych. Praca dotyczy problemu zjawisk kontaktowych wywołanych tarcie zwrotnym. W praktyce ten rodzaj zużycia występuje na powierzchni ciernej kół zestawów kołowych pojazdów szynowych jako równomiernie rozłożone wzniesienia i wgłębienia – określane jako zużycie krrugacyjne. Autor w swoich badaniach, dotyczących rozwiązania tego złożonego problemu, przeprowadził badania statystyczne, numeryczną symulację komputerową, badania stanowiskowe oraz badania eksploatacyjne na obiekcie rzeczywistym. W badaniach uwzględniono wpływ charakterystyk współczynnika tarcia na powstawanie zużycia korrugacyjnego. Zużyciu korrugacyjnemu towarzyszy zjawisko wywołane tarcie zwrotnym typu przyleganie – poślizg. W literaturze spotyka się nazwy tego zużycia określane jako zjawiska kontaktowe typu stick-slip.

1. Badania stanowiskowe

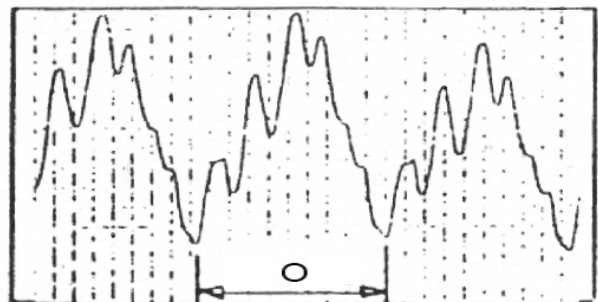
Zestawy kołowe pojazdów szynowych (rys. 1) należą do tych elementów, które decydują w największym stopniu o bezpieczeństwie eksploatowanego pojazdu i jednocześnie podlegają największym obciążeniom. Trwałość zestawów kołowych jest w tym ujęciu determinowana głównie przez intensywność procesu zużycia, [8].



Rys. 1. Układ obciążeń oraz przebieg momentów gnących osi zestawu kołowego w czasie ruchu pojazdu szynowego

Przeprowadzone przez autora liczne obserwacje zmian makropowierzchni ciernej kół zestawów kołowych wagonów wyposażonych w hamulce tarczowe lub klockowe oraz wykonane liczne pomiary owalizacji kół i korrugacji na powierzchni toczonej kół dały podstawę do stwierdzenia, że wagony z hamulcem tarczowym wykazują owalzację kół,

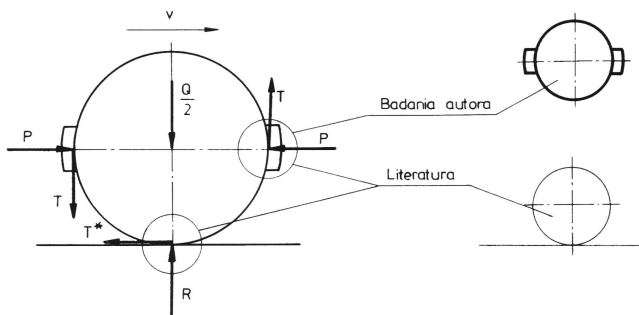
(rys. 2) natomiast wagony z hamulcem klockowym wykazują korrugację na powierzchni kół w strefie kontaktu kół z wstawką hamulca klockowego, rys.3.



Rys. 2. Wyniki pomiaru owalizacji kół wagonu osobowego wyposażonego w hamulec tarczowy: O – obwód kół

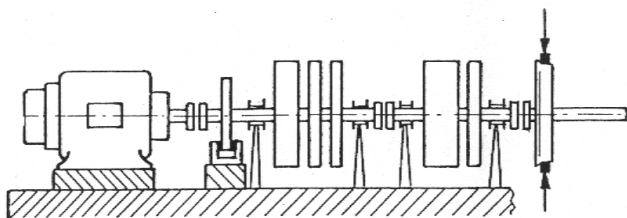


Rys. 3. Widok ogólny korrugacji na powierzchni toczonej kół wagonu wyposażonego w hamulec klockowy



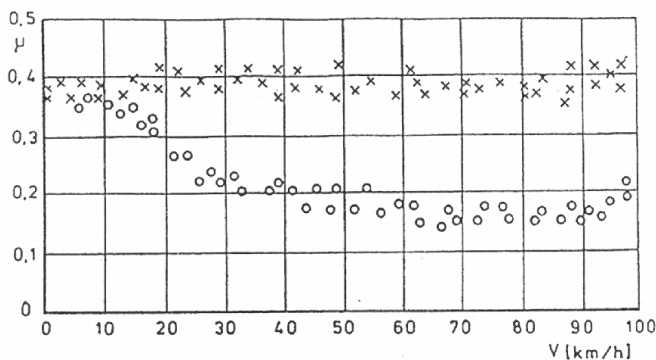
Rys. 4. Rysunek poglądowy ilustrujący obszar prowadzonej przez autora analizy zjawisk kontaktowych

Badania eksperymentalne powstawania zjawisk kontaktowych typu stick-slip, występujących w miejscu styku klocka hamulcowego z kołem, autor przeprowadził w Ośrodku Badawczym DB w Minden na stanowisku badawczym, rys. 5, gdzie energia kinetyczna wirujących mas bezwładności jest zamieniana na pracę sił tarcia między klockiem a kołem.



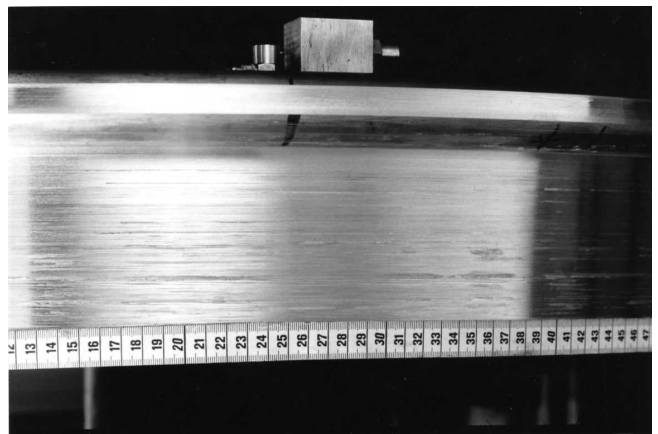
Rys. 5. Schemat ogólny stanowiska badawczego do badań współpracy, w skali 1:1, koła z wstawkami klocka hamulcowego

W badaniach stanowiskowych uwzględniono, między innymi, dwa rodzaje wstawek hamulcowych W_0 - wstawki żeliwne oraz W_x - wstawki prasowane z proszków metali, których rozkład wartości współczynnika tarcia zobrazowano na rys. 6.



Rys. 6. Wartości współczynnika tarcia: x - wstawki hamulcowe wykonane z prasowanych proszków metali, o - wstawki hamulcowe odlewane z żeliwa

Podczas prób hamowania na stanowisku bezwładnościowym zachowywano rzeczywiste parametry hamowania wagonu. Koło hamowane wstawkami W_x , prasowanymi z proszków metali, charakteryzujące się stałym współczynnikiem tarcia (rys. 6), nie wykazywało korrugacji na powierzchni ciernej, rys. 7.



Rys. 7. Widok ogólny powierzchni ciernej koła po hamowaniu wstawkami W_x

Koło hamowane wstawkami W_0 , gdzie współczynnik tarcia, (rys. 6), jest zależny od prędkości względnej koła i wstawkki, wykazywało zużycie korrugacyjne, rys. 8. Próba hamowania była przeprowadzona, w tym przypadku, dla prędkości 100 km/h i nacisku klocka hamulcowego 0,4 MPa.



Rys. 8. Widok ogólny powierzchni ciernej koła po hamowaniu wstawkami W_0

Widoczna podziałka, przyłożona do powierzchni ciernej koła, pozwala na odczytanie w centymetrach średniej wartości odległości pomiędzy widocznymi obszarami i obliczenia wartości częstotliwości stycznych przyspieszeń wstawkki hamulcowej.

Próby hamowania na stanowisku bezwładnościowym odpowiadały masie 8 ton przypadającej na 1 koło wagonu.

Jako optymalne warunki powstawania korrugacji koła należy wymienić:

- hamowanie wstawkami W_0 ,
- hamowanie do zatrzymania z prędkości 100 km/h,
- docisk klocka do koła 0,4 MPa,

Ukształtowanie się makroobrazu korrugacji koła stwierdzono już po 10 sekundach trwania próby hamowania. Należy zaznaczyć, że czas trwania próby hamowania z prędkości 100 km/h do zatrzymania koła wynosi około 90 sekund.

2. Badania symulacyjne

Badania symulacyjne ruchu klocka hamulcowego przeprowadzono dla układu mechanicznego, opisanego równaniem różniczkowym drugiego rzędu (1):

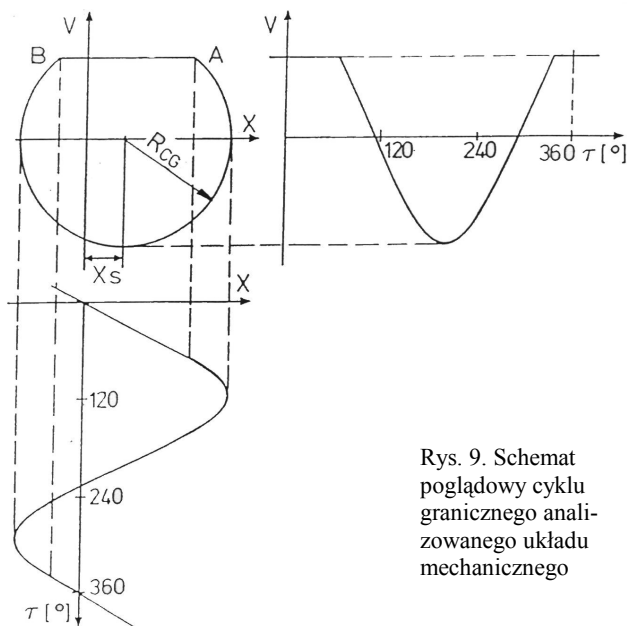
$$m \cdot \ddot{x} + d \cdot \dot{x} + c \cdot x = \mu \cdot F_N \cdot \text{sgn}(\dot{x} - v), \quad (1)$$

gdzie:

- m – masa skupiona klocka hamulcowego,
- d – współczynnik tłumienia,
- c – stała sprężystości,
- F_N – siła normalna,
- μ – współczynnik tarcia,
- x – przemieszczenie.

Prędkość liniowa koła v w miejscu styku z wstawką hamulcową występuje w tym równaniu niejawnie; jest ukryta w wyrażeniu na współczynnik tarcia, rys.6.

Na podstawie symulacji komputerowej otrzymano, między innymi, czas trwania fazy przylegania (faza stick) – odcinek AB, rys. 9. Istnienie fazy stick limituje proces powstawania korrugacji koła, (rys. 8), [4].



Rys. 9. Schemat poglądowy cyklu granicznego analizowanego układu mechanicznego

Klocek pozostaje w fazie przylegania (faza stick) tak długo, dopóki siła sprężyny równa jest maksymalnej przenoszonej sile tarcia. W tym układzie można obliczyć punkt rozdziału X_A :

$$x_A = F_N \cdot \mu / c, \quad (2)$$

w którym klocek przechodzi z fazy przylegania - „stick” w fazę poślizgu klocka względem koła - „slip”.

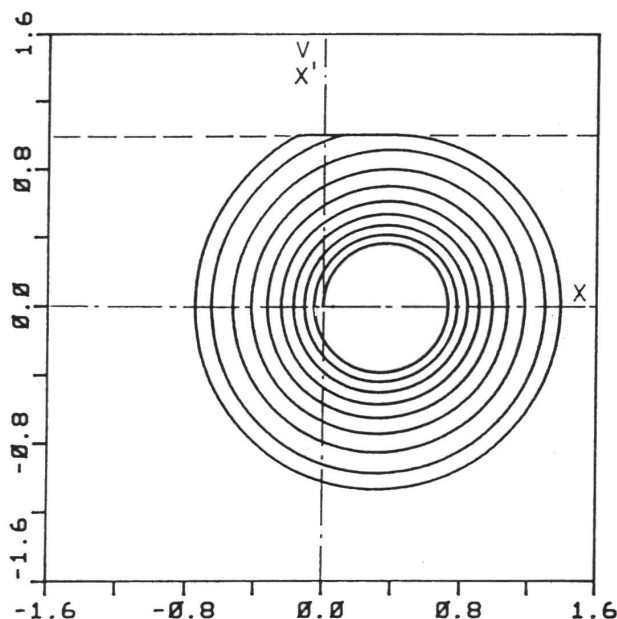
Badania symulacyjne współpracy wstawki hamulcowej z kołem przeprowadzono dla współrzędnych bezwymiarowych (3):

$$X'' + 2 \cdot \gamma \cdot X' + X = \mu \cdot \delta \cdot (X' - V) \cdot \text{sgn}(X' - V), \quad (3)$$

gdzie:

- $\mu(V_r)$ – model tarcia w funkcji bezwymiarowej prędkości względnej,
- γ – bezwymiarowe tłumienie,
- V – bezwymiarowa prędkość koła,
- X – bezwymiarowe przemieszczenie.

Program numerycznej symulacji zjawisk kontaktowych typu stick-slip, to jest drgań samowzbudnych klocka hamulcowego wywołanych tarcie zwrotnym, został napisany w języku PASCAL. Przykładowy wykres fazowy powstawania cyklu granicznego, podczas symulacji hamowania wstawkami Wo, przedstawiono na rys. 10.



Rys. 10. Przykładowy wykres fazowy powstawania cyklu granicznego analizowanego układu mechanicznego: hamowanie wstawkami Wo: - - - - - bezwymiarowa prędkość koła V' , X' - bezwymiarowa prędkość klocka hamulcowego

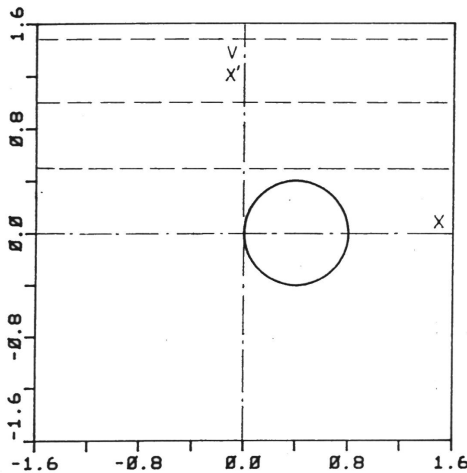
Z analizy wykresu na rysunku 10 wynika, że odcinek cyklu granicznego dla zerowej wartości względnej prędkości koła V i klocka hamulcowego X' odpowiada fazie przylegania klocka do koła. Pozostała część cyklu granicznego odpowiada fazie poślizgu klocka po kole.

Na rys. 11 zamieszczono, dla przykładu, wykres fazowy powstawania cyklu granicznego, podczas symulacji hamowania wstawkami Wx.

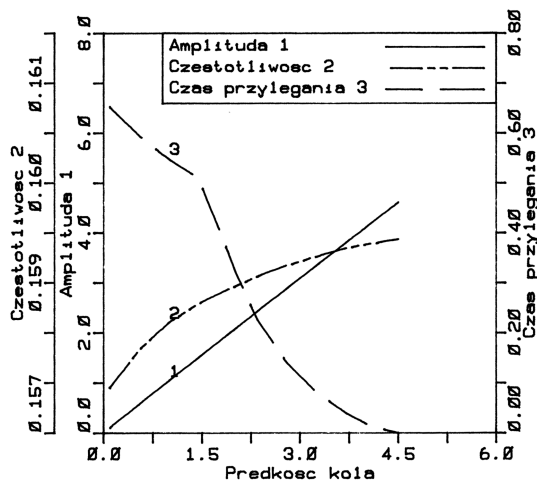
Z analizy wykresu na rysunku 11 wynika, że cykl graniczny nie wykazuje fazy przylegania. Wykres cyklu odpowiada, w całym zakresie, fazie poślizgu klocka po kole.

Na podstawie przeprowadzonej analizy wyników badań symulacyjnych wpływu modelu tarcia, rys.6, na zachowanie się badanego układu mechanicznego dla współrzędnych bezwymiarowych stwierdzono, że:

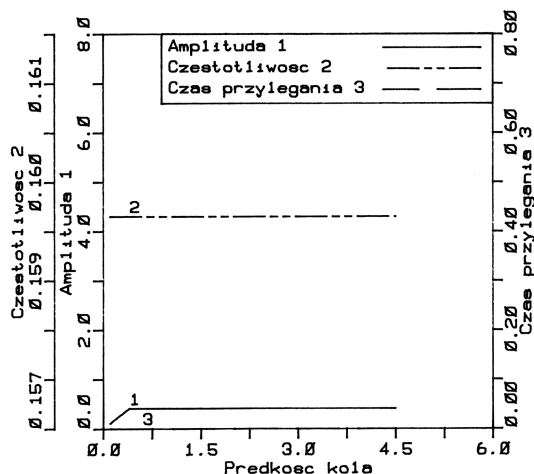
- a) dla materiału Wo faza przylegania występuje, rys. 12,
- b) dla materiału Wx faza przylegania nie występuje, rys. 13.



Rys. 11. Przykładowy wykres fazowy powstawania cyklu granicznego analizowanego układu mechanicznego: hamowanie wstawkami Wx: --- - bezwymiarowa prędkość koła V' , X' - bezwymiarowa prędkość klocka hamulcowego



Rys. 12. Wynik badań symulacyjnych: materiał wstawki hamulcowej Wx



Rys. 13. Wynik badań symulacyjnych: materiał wstawki hamulcowej Wx

Z analizy wyników badań symulacyjnych, przedstawionych na rys. 12, wynika, że dla wstawk hamulcowych Wx faza przylegania występuje. Czas trwania fazy przylegania klocka do koła, wraz ze wzrostem prędkości koła, maleje. Po przekroczeniu prędkości granicznej koła występuje tylko faza poślizgu.

Z analizy wyników badań symulacyjnych, przedstawionych na rys. 1, wynika, że dla wstawk hamulcowych Wo faza przylegania klocka do koła nie występuje.

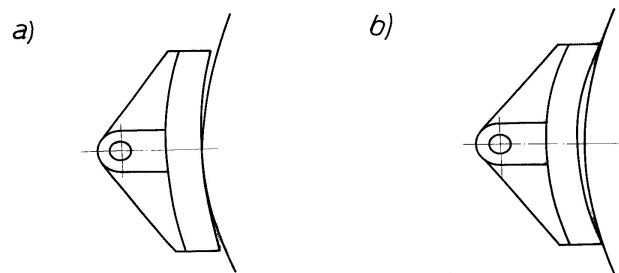
Powyższe badania, których wyniki zamieszczono na rys.12 oraz rys. 13, wykazały pełną zgodność w odniesieniu do wyników analizy Uetza [6] przedstawionej w formie zapisu (4);

$$V_{gr} \geq \frac{P \cdot (\mu_s - \mu_k)}{\sqrt{c \cdot m}} \quad (4)$$

Z zapisu nierówności (4) wynika, że wraz ze zmniejszeniem się wartości różnicy współczynnika tarcia statycznego i dynamicznego, $(\mu_s - \mu_k)$, zmniejsza się również wartość granicznej prędkości liniowej koła podczas hamowania V_{gr} , tzn. faza przylegania zostaje wyeliminowana i występuje tylko ciągle poślizg klocka po kole.

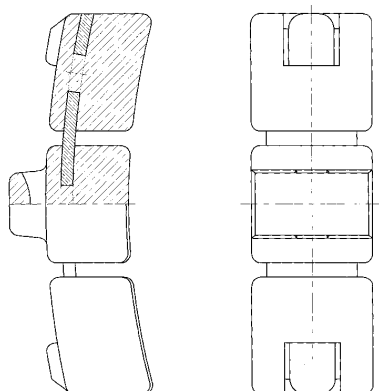
3. Odształcenia cieplne wstawki hamulcowej

Materiał wstawki hamulcowej ulega podczas procesu hamowania odkształceniom cieplnym, rys.14. W pierwszej fazie hamowania wstawka hamulcowa ulega odkształceniom cieplnym, rys. 14a. W wyniku tej deformacji styk rozłożony przyjmuje formę styku skupionego w części środkowej powierzchni przylegania wstawki do koła. Tak ukształtowany styk skupiony przylegania wstawki do koła wyjaśnia powstawanie korrugacji w początkowej fazie hamowania. W kolejnej fazie hamowania następuje ponowne odkształcenie wstawki hamulcowej, rys. 14b. W wyniku ponownej deformacji wstawki hamulcowej styk skupiony w środkowej części wstawki przyjmuje formę kontaktu w dwóch skrajnych obszarach przylegania wstawki.



Rys. 14. Mechanizm zużywania się klasycznych wstawk hamulcowych, [7]: a) odkształcenie w pierwszej fazie hamowania - powstawanie korrugacji koła, b) kolejna faza odkształcenia.

Na rys. 15. zamieszczono widok ogólny wstawki 3-segmentowej. Konstrukcja wstawki 3-segmentowej spowodowała wyeliminowanie deformacji cieplnej, która towarzyszy wstawkom klasycznym, przedstawionym na rysunku 14.



Rys. 15. Segmentowa wstawka hamulcowa, [7]

Na podstawie wyników badań stanowiskowych 3-segmentowych wstawek hamulcowych wykonanych z żeliwa P10 stwierdzono, między innymi, że:

- w przeciwieństwie do wstawek klasycznych nie zaobserwowano nierównomiernego zużycia się wstawek segmentowych,
- w przeciwieństwie do wstawek klasycznych nie stwierdzono występowania obszarów o wyraźnie zwiększonym obciążeniu cieplnym.

4. Podsumowanie

Współpracę wstawki hamulcowej z kołem, w kontekście wyeliminowania korrugacji koła, można stymulować poprzez:

- dobór materiału wstawki hamulcowej, np. materiału Wx, o stałej wartości współczynnika tarcia,
- dobór konstrukcji wstawki hamulcowe, np. wstawka wielosegmentowa,
- dobór optymalnych warunków hamowania, tzn. ograniczenie tych parametrów hamowania, które sprzyjają procesowi inicjacji korrugacji koła.

Wprowadzenie wstawek hamulcowych Wx pozwoliło na wyeliminowanie fazy kontaktowej stick, a tym samym wyeliminowanie powstawania korrugacji koła – zużycia charakterystycznego dla klasycznych wstawek hamulcowych.

Wprowadzenie wstawek hamulcowych 3-segmentowych wyeliminowało proces deformacji cieplnej, który jest obserwowany w klasycznych wstawkach hamulcowych.

Optymalizacja warunków hamowania, dla wstawek klasycznych, pozwala na wykazanie tych parametrów hamowania; prędkość 100 km/h, nacisk wstawki hamulcowej 0,4 MPa, które w szczególny sposób inicjują proces powstawania korrugacji koła.

Literatura

- [1] Lisowski Z.: *Zużycie. Zagadnienia tarcia, zużycia i smarowania*. Z. 6, 1969, PWN, Warszawa 1970, s. 129-1166.
- [2] Piec P.: *On study of phenomena in the wheel – brake shoe contact area*. *Periodica Polytechnica, TU Budapest, Vol. 21. No. 3. 1993, Part III*, s.229÷238
- [3] Piec P.: *Some methods of investigation of rail vehicle elements wear processes*. *Archiwum transportu. Volume 16, No 3, Warsaw.2004, p. 21÷39*.
- [4] Piec P.: *Badania eksploatacyjne elementów i zespołów pojazdów szynowych*. *Wyd. Politechniki Krakowskiej, 2004*.
- [5] Skvor R.: *Riffel - oder Polygonbildung von Schienenfahrzeugen*. *Verkehrstechnik in der Schweiz 1979/80, nr 16, ss. 33÷38*.
- [6] Uetz H.: *Tribologie - Verschleisskunde. Vorlesungsmanuskript, Universitaet Stuttgart, 1980*.
- [7] Urbańczyk P.: *Wpływ odkształceń cieplnych wstawek nowej konstrukcji na pracę hamulca*. *Praca doktorska. Promotor P. Piec. Politechnika Krakowska. Kraków, 2011*.
- [8] Zwierzyk-Klimek.: *Analiza zużycia i kosztów eksploatacji zestawów kołowych tramwajów*. *Praca doktorska. Promotor P. Piec. Politechnika Krakowska. 2006*.