

Jacek Idziak
VEROCEL Polska sp. z o.o.
Paweł Idziak
Politechnika Poznańska, Poznań

NUMERYCZNE WYZNACZANIE CZĘSTOTLIWOŚCI DRGAŃ STYCZNYCH SZCZOTKI W MASZYNIE PRĄDU STAŁEGO

COMPUTATION OF FREQUENCY VALUES OF BRUSH TANGENTIAL VIBRATION IN MACHINE DC

Streszczenie: W pracy przedstawiono układ równań nieliniowych opisujący ruch szczotki w kierunku stycznym do kierunku ruchu styku ruchomego i pozwalający określić częstotliwości drgań stycznych szczotki. Rozważania przeprowadzono dla przypadku szczotki pracującej w maszynie prądu stałego. W opracowanym algorytmie obliczeń uwzględniono rzeczywiste zmiany współczynnika tarcia występującego pomiędzy powierzchnią ślizgową komutatora a szczotką w zależności od prędkości wzajemnej styków. Uwzględniono wpływ gęstości przewodzonego przez zestyk prądu oraz luz szczotki w gnieździe trzymadła. W zaimplementowanym w środowisku Matlab Simulink programie obliczeniowym uwzględniono nieciągłość powierzchni styku szczotki i komutatora. W obliczeniach wykorzystano charakterystyki tarcia szczotki o styk ruchomy jako funkcji prędkości wzajemnej współpracujących elementów wyznaczone doświadczalnie dla wybranej pary materiałów oraz odwzorowano rzeczywisty kształt komutatora.

Abstract: The paper discloses a system of nonlinear equations describing the movement of the brush in the tangential direction to the moving direction of the movable contact and for defining the oscillation frequency of the brushes. Considerations performed for the case of working brushes in DC machine. The developed algorithm calculation takes into account the actual change of the friction between the sliding surface of the commutator and the brush, depending on the speed of mutual contact. Taking into account the impact of the density of current flowing through the contact and brush clearance in the slot holders as well. As implemented in Matlab Simulink calculation program included the brush and commutator contact surface discontinuity. Used in the calculation of the friction characteristics of the movable contact brushes as a function of the speed of mutual cooperation means empirically determined for the selected pair of materials. Moreover, mapped the actual shape of the commutator.

Słowa kluczowe: zestyk ślizgowy, samowzbudne drgania styczne szczotki, współczynnik tarcia, modelowanie numeryczne

Keywords: sliding contact, self-excited vibrations tangential of brushes, the coefficient of friction, numerical modelling,

1. Wprowadzenie

Zestyk ślizgowy jest jednym z ważniejszych elementów konstrukcyjnych układów elektro-mechanicznych, w których zachodzi konieczność dostarczenia lub odprowadzenia energii elektrycznej do elementu pozostającego w ruchu. Prace nad transmisją tej formy energii metodami bezkontaktowymi, do dnia dzisiejszego, nie dostarczają satysfakcjonujących rozwiązań. Elementy składowe tego węzła to styk ruchomy (pierścień ślizgowy maszyny synchronicznej lub indukcyjnej, komutator lub układ pantografu w trakcji) oraz tzw. styk nieruchomy czyli szczotki umieszczone w gniazdach trzymadła lub przewód trakcyjny i szyny. W przypadku przewodów trakcyjnych określenie „styk

nieruchomy” jest w pełni uzasadnione, natomiast w przypadku szczotek jest określeniem daleko nieprecyzyjnym.

Aby możliwa była stabilna praca urządzenia pozostającego w ruchu i zasilanego poprzez węzeł zestyku ślizgowego, współpracujące ze sobą elementy tzn. styk ruchomy i nieruchomy powinny zapewniać ciągłość przepływu prądu. Zjawiska zachodzące w obszarze przewodzenia prądu w tym węźle doczekały się wielu opisów i teorii je tłumaczących [1,3,7,10,11,13]. Niestety żadna z opracowanych teorii nie tłumaczy kompleksowo wszystkich obserwowanych zjawisk [8,11]. Wynika to z wyjątkowo złożonego powiązania procesów mechanicznych, w tym trybologicznych, z procesami elektro-che-

micznego zużycia i transportu materii i procesami cieplnymi. Ponieważ stabilna i długotrwała praca tego węzła decyduje o zdolnościach do eksploatacji całej maszyny, mimo braku satysfakcjonujących opisów analitycznych, trwają prace nad poszukiwaniem nowych konstrukcji i nowych materiałów.

Jednym ze zjawisk zachodzących samoistnie podczas pracy zestyku ślizgowego jest zagrożenie powstania drgań stycznych szczotek (tzw. drgania samowzbudne). Drgania te obniżają stabilność mechaniczną zestyku. Zjawisko samoczynnego powstawania tych drgań w układach mechanicznych zostało dobrze opisane w literaturze [2,9,12]. Spowodowane jest ono zmienną wartością kinetycznego współczynnika tarcia szczotki o styk ruchomy w zależności od prędkości wzajemnej trących o siebie elementów. Niebezpieczeństwo wystąpienia tych drgań, tj. drgań w kierunku stycznym do kierunku ruchu, zachodzi w układach spełniających warunek $dv/dv < 0$, w którym μ - to wartość kinetycznego współczynnika tarcia, a v - prędkość wzajemna styków. Znacznie mniej prac dotyczy występowania tego zjawiska w maszynach elektrycznych [4,5,6,7,9,10]. Szczególnie istotna pozostaje konieczność wyznaczenia spodziewanych częstotliwości tych drgań; ich maksymalna amplituda jest bowiem z góry określona przez wartość luzu szczotki w gnieździe trzymadła. W pracach [4,5,9] przedstawiono analityczne rozwiązanie pozwalające oszacować wspomniane częstotliwości dla ściśle zdefiniowanych warunków. Niniejsza praca stanowi kontynuację badań prezentowanych w pracach [8,9] i zmierza do opracowania metody pozwalającej, na etapie projektowania maszyny, ocenić czy w proponowanym rozwiązaniu nie wystąpi zjawisko drgań rezonansowych.

2. Opis modelu numerycznego

Ruch szczotki zamocowanej w trzymadle maszyny prądu stałego w kierunku stycznym do kierunku ruchu styku ruchomego opisać można układem nieliniowych równań (1). Uwzględniono w nim zarówno sprężystość modelowanego trzymadła szczotkowego, a dokładniej sprężystość układu: ścianka trzymadła – szczotka oraz zmiany średniej wartości prądu wynikające z nieciągłości powierzchni komutatora. W obliczeniach niezbędne jest zadeklarowanie zarówno liczby wycinków komutatora jak też szerokości przerwy międzywycinkowej.

$$\left\{ \begin{array}{l} m_{sz} \frac{d^2 x}{dt^2} - T \left(v_n - \frac{dx}{dt} \right) + K x = 0 \\ K = \begin{cases} K_1 \rightarrow x > \delta \\ 0 \rightarrow -\delta < x < +\delta \\ K_2 \rightarrow x < -\delta \end{cases} \\ T = \mu P \\ \mu = f \left(\left(v_n - \frac{dx}{dt} \right); j \right) \\ s = f(x) \\ j = \frac{I_s}{s(x)} \end{array} \right. \quad (1)$$

W przyjętym układzie równań wielkości oznaczone jako: m_{sz} - masa szczotki, v_n - prędkość styku ruchomego, K - współczynnik sprężystości układu szczotka trzymadło szczotkowe, I_s - wartość średnia prądu płynącego przez szczotkę, P - siła nacisku na szczotkę są wielkościami zadanymi; natomiast: T - siła tarcia, μ - współczynnik tarcia, j - gęstość prądu, s - powierzchnia styczności szczotka-komutator są wielkościami obliczanymi.

Poszukiwanym rozwiązaniem jest opis trajektorii ruchu szczotki w funkcji czasu. Z kolei znajomość zmian położenia szczotki w czasie pozwala wyznaczyć poszukiwane częstotliwości własne.

W przedstawionym układzie równań (1) nie uwzględniono tarcia szczotki o ściany trzymadła oraz sił wynikających z oporów aerodynamicznych występujących podczas ruchu szczotki.

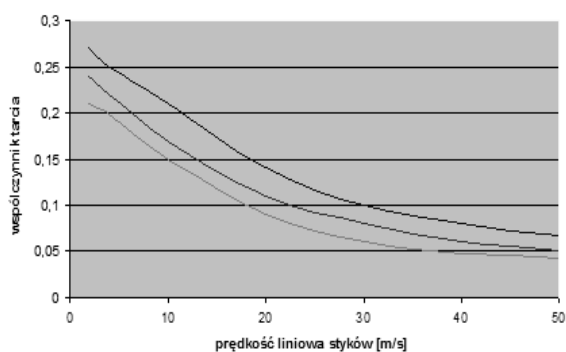
Na potrzeby eksperymentu obliczeniowego metodą doświadczalną wyznaczono:

- zależność współczynnika tarcia od prędkości i gęstości prądu,
- współczynnik sprężystości K .

Algorytm rozwiązania układu równań (1) zaimplementowano w środowisku Matlab Simulink.

W stosunku do wcześniejszej pracy [8] w prezentowanej wersji algorytmu uwzględniono dodatkowo zmienny, rzeczywisty profil powierzchni komutatora.

Przykładowe przebiegi zależności współczynnika tarcia szczotki o komutator w funkcji prędkości wzajemnej styków dla różnych wartości gęstości przewodzonego prądu przedstawiono na rysunku 1.



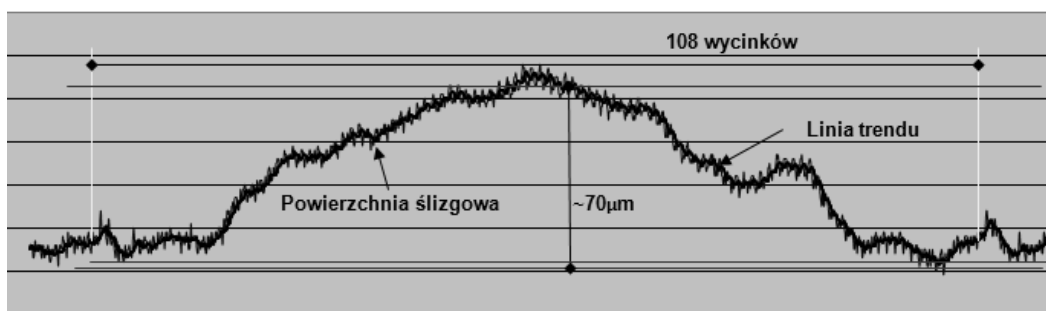
Rys. 1. Zależność współczynnika tarcia szczotki w funkcji prędkości wzajemnej styków dla materiału typu E 35

Przedstawione na rysunku 1 krzywe prezentują odpowiednio zmiany wartości współczynnika tarcia wyznaczone dla średniej gęstości prądu wynoszącej $j = 10 \text{ A/cm}^2$; krzywa położona najniżej – gęstość prądu $j = 10 \text{ A/cm}^2$, krzywa –

środkowa – $j = 5 \text{ A/cm}^2$, krzywa położona najwyżej – stan bezprądowy.

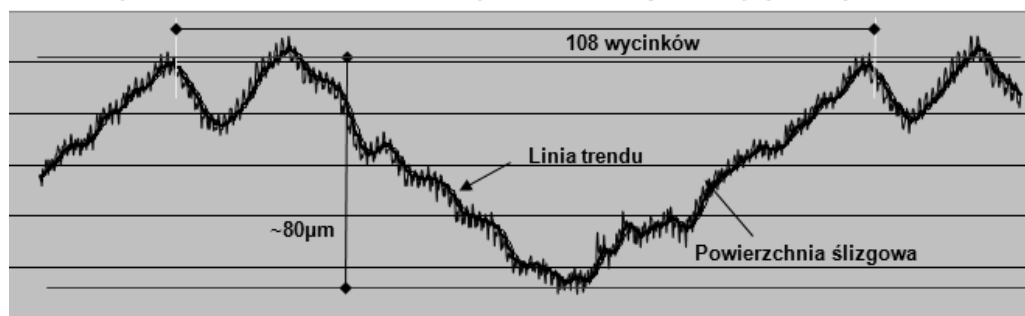
Komutator maszyny prądu stałego jest, pod względem mechanicznym, tworem niezwykle złożonym. Występujące w nim kolejno: wycinek wykonany z miedzi i przekładka izolacji międzywycinkowej powoduje, że pod wpływem sił odśrodkowych, a także dylatacji termicznej (nagrzewanie się komutatora podczas pracy) profil jego powierzchni ulega zmianie [8,14]. Dotyczy to zarówno nowych komutatorów odwirowanych i wdrożonych do pracy jak też komutatorów już eksploatowanych. Zmiany profilu są jednak przede wszystkim powiązane z aktualną prędkością wirowania. Rysunki 2 i 3 prezentują profil tego samego komutatora uzyskany podczas jego wirowania z różnymi prędkościami obrotowymi.

Profil powierzchni komutatora silnika nr 1 podczas odwirowywania z prędkością 750 obr/min



Rys. 2. Profil powierzchni komutatora podczas wirowania z prędkością 750 obr/min

Profil powierzchni komutatora silnika nr 1 podczas odwirowywania z prędkością 1500 obr/min



Rys. 3. Profil powierzchni tego samego komutatora podczas wirowania z prędkością 1500 obr/min

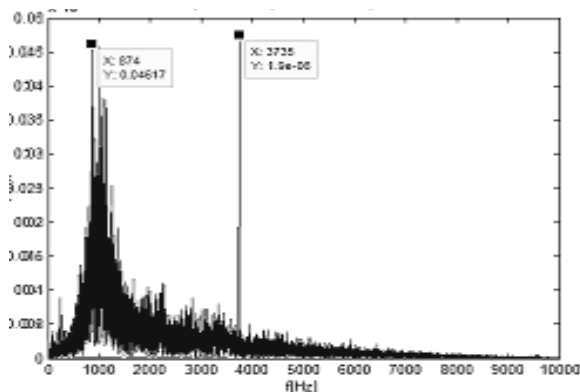
3. Rezultaty obliczeń

Zamieszczone w niniejszej pracy obliczenia przeprowadzono dla szczotki wykonanej z elektrografitu typu E35 podczas pracy styku ruchomego z prędkością $v_n = 24,7 \text{ m/s}$, z zachowaniem luzu szczotki w gnieździe trzymadła wynoszącym $\delta = 0,1 \text{ mm}$, przy nacisku jed-

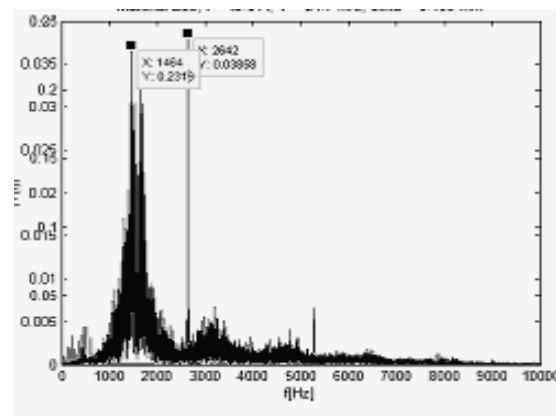
nostkowym na szczotkę $P = 2,2 \text{ N/cm}^2$. Wartość luzu przyjęto zgodnie z zaleceniami Polskiej Normy BN-81/3010-20 i BN-81/3010-21. Wartość siły nacisku ustalono jako wartość średnią zalecaną przez producentów testowanych materiałów szczotkowych.

Rysunki 4 do 9 przedstawiają obliczone widma drgań stycznych szczotki obciążonej prądem o

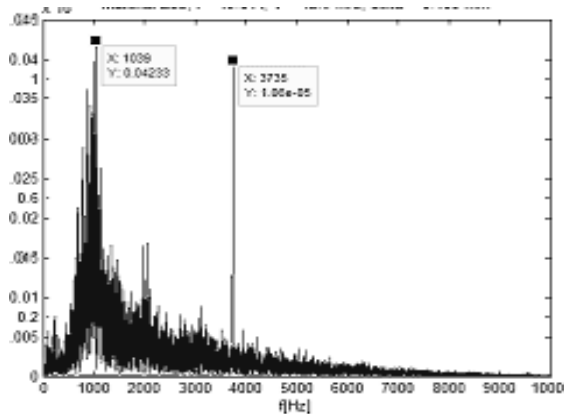
różnych wartościach oraz dla dwóch prędkości wzajemnych styków.



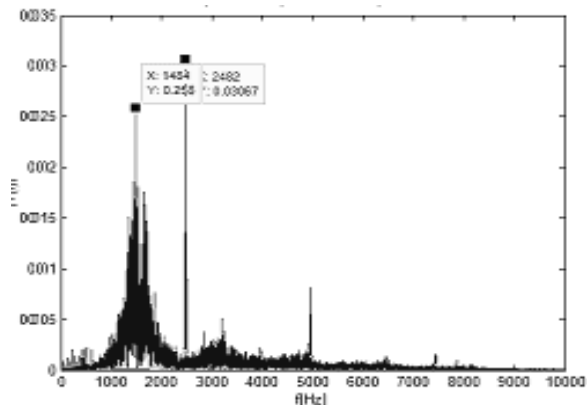
Rys. 4. Widmo drgań stycznych szczotki obciążonej prądem 10 A/cm^2 i prędkości obrotowej komutatora wynoszącej 750 obr/min



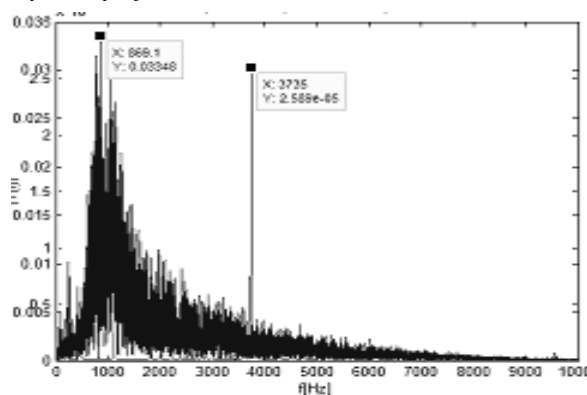
Rys. 5. Widmo drgań stycznych szczotki obciążonej prądem 10 A/cm^2 i prędkości obrotowej komutatora wynoszącej 1500 obr/min



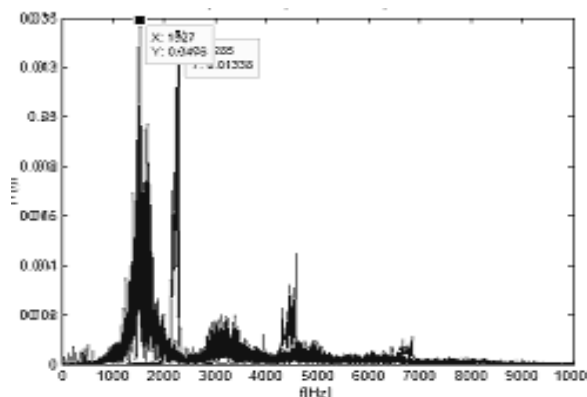
Rys. 6. Widmo drgań stycznych szczotki obciążonej prądem 15 A/cm^2 i prędkości obrotowej komutatora wynoszącej 750 obr/min



Rys. 7. Widmo szczotki obciążonej prądem 15 A/cm^2 i prędkości obrotowej komutatora wynoszącej 1500 obr/min



Rys. 8. Widmo drgań stycznych szczotki obciążonej prądem 18 A/cm^2 i prędkości obrotowej komutatora wynoszącej 750 obr/min



Rys. 9. Widmo drgań stycznych szczotki obciążonej prądem 18 A/cm^2 i prędkości obrotowej komutatora wynoszącej 1500 obr/min

W prezentowanym eksperymencie przyjęto, że wartości liniowej prędkości wzajemnej styków, odpowiadają wirowaniu komutatora z prędkościami 750 obr/min i 1500 obr/min.

Na każdym z prezentowanych rysunków zaznaczono wartość dominującej częstotliwości dla

przypadku obliczeń przeprowadzonych bez uwzględnienia rzeczywistego profilu komutatora oraz po jego uwzględnieniu.

Przy doborze wartości gęstości prądu kierowano się wartościami występującymi w powszechnie stosowanych maszynach prądu stałego małej i średniej mocy.

4. Rezultaty obliczeń i podsumowanie

Eksperyment obliczeniowy wykazał, że dla rozpatrywanego materiału częstotliwości samowzbudnych drgań stycznych szczotek nie przekraczają wartości kilku kiloherców. Oznacza to, że ich wartości mieszczą się w przedziale częstotliwości wymuszeń mechanicznych powstających w pracującej maszynie. Zauważono potencjalne niebezpieczeństwo wystąpienia zjawiska rezonansu mechanicznego. Uwzględnienie, w obliczeniach, rzeczywistego profilu komutatora powoduje istotne „wzbogacenie” wyznaczanego widma. Generalnie powoduje to zmniejszenie wartości częstotliwości dominującej. Stwarza to dodatkowe zagrożenie powstania wspomnianego rezonansu.

Opracowany, autorski program symulacyjny może być wykorzystany w procesie projektowania i doboru optymalnych, ze względu na stabilność mechaniczną, warunków pracy zestyku ślizgowego maszyny elektrycznej. Jego pełną użyteczność osiągnąć można budując odpowiednio bogatą bazę danych materiałowych (charakterystyki współczynnika tarcia jako funkcji prędkości wzajemnej styków dla różnych wartości gęstości prądu) oraz bazę spodziewanych deformacji stosowanych komutatorów.

5. Literatura

- [1] Belt W. B.: *Practical aspects of brush contact stability*, Trans. AIEE, Part III, Power and Systems, 1954, pp 44-48
 [2] Bowden E., Tabor: *Friction and lubrication*, Methuen and Co. Ltd London
 [3] Dąbrowski M.: *Uwagi o dynamice zestyku ślizgowego maszyny elektrycznej*, Przegląd Elektrotechniczny nr 11/1963 s. 423-429

[4] Dąbrowski M., Idziak P.: *Powstawanie drgań stycznych szczotek w maszynach elektrycznych*, Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej, Seria Elektryka No 25 1983 r str. 111-117

[5] Dąbrowski M., Idziak P.: *Wpływ niektórych parametrów zestyku ślizgowego na drgania styczne szczotek*, Przegląd elektrotechniczny, no 63 no 10 1987 s. 269-271

[6] Dridzo M. L.: *Ocenka tangencjalnych sil ščetočnokolektornogo uzla električeskich mašin postojannogoi toka*, Elektromechanika 1969/4 ss. 380-389

[7] Holm R. : *Electric Contacts Handbook*. Springer Verlag Berlin 1958 third edition

[8] Idziak P.: *Analiza wybranych zjawisk sprzężonych zachodzących w maszynach prądu stałego*, Seria Monografie Nr 510 Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej Poznań 2013 r.

[9] Kellenberger W.: *The effect on the mechanical stability of shafts fitted with sliprings of the pressure exerted by carbon brushes*, Brown Boveri Review, 1969 no 8 pp. 356-367

[10] Liwšic P.C. : *Školzjaščij kontakt električeskich mašin*, Energia Moskwa 1974

[11] Muszalski Z.: *Teoria i fizyka komutacji maszyn elektrycznych*, PWN Warszawa 1997

[12] Niellin W.I.: *Mechanika školzjaščego kontakta. Vlijanie mehaničeskich faktorow na električeskij školzjaščij kontakt*, Izdatielstvo- Transport, Moskwa 1966

[13] Wilk A., Mosoń I., Dobrowolski P., Michna M.: *Badania symulacyjne drgań szczotki z wykorzystaniem matematycznego modelu 2D komutatorowego zestyku ślizgowego maszyny elektrycznej*, Proceedings of XLII nd International Symposium on Electrical Machines SME 2006, 3-6 July, Crocow, Poland, s. 87-90

[14] Wilk A., Mosoń I.: *The wave charakter of commutator wear in electrical machines*, Wear 253 (2002), s. 935-945

Autorzy

Jacek Idziak, mgr inż.

VEROCEL – Polska sp. z o.o.

jacek.idziak@gmail.com

Paweł Idziak dr hab. inż. Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej Politechniki Poznańskiej, pawel.idziak@put.poznan.pl