

Włodzimierz Zieliński
Politechnika Lubelska, Lublin

ANALIZA MATEMATYCZNA WYNIKÓW ISKRZENIA MASZYN KOMUTATOROWYCH PRĄDU STAŁEGO

MATHEMATICAL ANALYSIS OF SPARKING RESULTS IN DIRECT-CURRENT COMMUTATING MACHINES

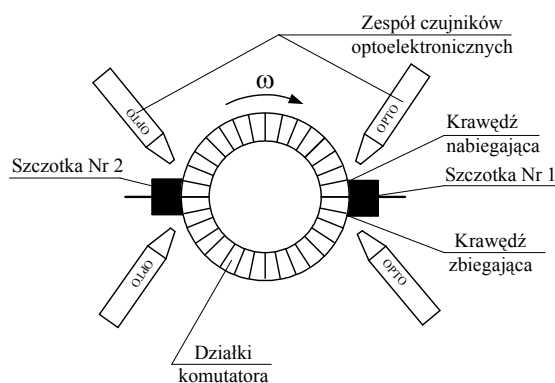
Abstract: The paper presents mathematical apparatus in the form of indicators that makes possible to describe sparking processes forming at the moving contact of brush bridges with commutator bars at the 'oncoming' and 'leaving' sides in direct-current commutating machines. The formulated mathematical dependences make possible to observe and analyze sparking distribution of each single commutator bar in the course of a whole measuring cycle or during an arbitrarily selected revolution or a few successive revolutions of the commutator within the measuring cycle. Boundary values of the proposed sparking indicators have also been given.

1. Wstęp

Dotychczasowy brak zadawalającego technicznie układu pomiarowego względnie obiektywnej oceny iskrzenia spowodował podjęcie prac mających na celu opracowanie nowoczesnej metody pomiaru iskrzenia powstającego podczas pracy maszyny komutatorowej na krawędziach szczotek i działek komutatora. Obecnie dzięki sprzęgnięciu systemu komputerowego wspomagającego proces pomiarowy i analizatora iskrzenia [3,4] stało się możliwe opracowanie zespołu wskaźników pozwalających na kontrolę obwodu komutatora z punktu widzenia nierówności każdej indywidualnej działki, kontrolę identyfikacji poszczególnych działek komutatora, kontrolę prędkości obrotowej, wybór czasu trwania cyklu pomiarowego, ocenę iskrzenia poszczególnych działek komutatora poprzez obliczenia prostych wartości średnich sygnałów świetlnych lub ważonych wartości średnich w całym cyklu pomiarowym, kontrolę intensywności iskrzenia każdej działki w każdym kolejnym obrocie cyklu pomiarowego [1,5].

2. Komputerowe wskaźniki oceny iskrzenia szczotek

Przyjmując założenia upraszczające pomijające przyczyny powstawania iskrzenia na styku szczotka-komutator (rys.1), do oceny iskrzenia można zaproponować szereg wskaźników [2,6]. Wskaźniki odnoszą się do przetworzonych sygnałów świetlnych przez czujniki optoelektroniczne a odzwierciedlających iskry powstające na styku krawędzi szczotki zbiegającej względnie nabiegającej z komutatora.



Rys.1. Komutator maszyny prądu stałego wraz z zespołem czujników optoelektronicznych

W maszynie prądu stałego o liczbie działek komutatora K i liczbie par biegunów p , w czasie trwania cyklu pomiarowego na wszystkich działkach komutatora może wystąpić Z isker. Przy czym każda ze szczotek (jednimiennych mostów szczotkowych) może wyemitować (np. most nr.1.) Z_1 isker:

$$Z_1 = Z_{1Z} + Z_{1N} \quad (1)$$

przy czym:

- Z_{1Z} - jest liczbą isker wyemitowaną z krawędzi zbiegającej szczotki,
- Z_{1N} - jest liczbą isker wyemitowaną z krawędzi nabiegającej szczotki.

$$Z_{1Z} = Y_{1Z} + Y_{2Z} + Y_{3Z} + \dots + Y_{xZ} + \dots + Y_{KZ} \quad (2)$$

$$Z_{1N} = Y_{1N} + Y_{2N} + Y_{3N} + \dots + Y_{xN} + \dots + Y_{KN}$$

gdzie:

Y_{xZ} – jest liczbą wszystkich iskier dowolnej działki komutatora krawędzi zbiegającej,

Y_{xN} – jest liczbą wszystkich iskier dowolnej działki komutatora krawędzi nabiegającej.

W przypadku maszyny 2p biegunowej liczba wszystkich iskier na obu krawędziach szczotek wynosi:

$$Z = \sum_{p=1}^p Z_p \quad (3)$$

Jeżeli intensywności iskier strumienia światła generowanego przez iskry dowolnej działki zostaną zdyskretyzowane na dziesięć klas w zakresie $k = 1$ do $k = 10$ wówczas suma iskier tej działki wynosi:

$$Y_{xZ} = d_{xZ,1} + d_{xZ,2} + d_{xZ,3} + \dots + d_{xZ,k=10} \quad (4)$$

$$Y_{xN} = d_{xN,1} + d_{xN,2} + d_{xN,3} + \dots + d_{xN,k=10}$$

gdzie:

$d_{xZ,k=10}$; $d_{xN,k=10}$, – jest liczbą działki x-tej o k-tej intensywności iskrzenia (krawędzi zbiegającej, nabiegającej).

Ważona liczba iskier krawędzi zbiegającej $Y_{Zx,sk}$ jest określona:

$$Y_{Zx,sk} = k \cdot d_{xZ,k=10} \quad (5)$$

Ważona liczba iskier krawędzi nabiegającej $Y_{Nx,sk}$ jest określona:

$$Y_{Nx,sk} = k \cdot d_{xN,k=10} \quad (6)$$

pod warunkiem liniowej zależności przetworzonych sygnałów iskrzenia od intensywności iskier.

Liczba iskier Z_{Nk} i Z_{Zk} o k-tej intensywności jest określona przez:

$$Z_{Nk} = d_{N1,k} + d_{N2,k} + d_{N3,k} + \dots + d_{Nx,k} + \dots + d_{NK,k}$$

$$Z_{Zk} = d_{Z1,k} + d_{Z2,k} + d_{Z3,k} + \dots + d_{Zx,k} + \dots + d_{ZK,k}$$

(7)

Połączenie liczby iskier, ich intensywności oraz rodzaju krawędzi pozwala zdefiniować macierz Z jako:

$$\begin{aligned} [Z] &= [(Z_{1Z} + Z_{1N}), (Z_{2Z} + Z_{2N}), \dots, (Z_{KN} + Z_{KZ})]^T = \\ &= \left[\sum_{k=1}^{10} (d_{1,Z,k} + d_{1,N,k}), \dots, \sum_{k=1}^{10} (d_{K,Z,k} + d_{K,N,k}) \right]^T \end{aligned} \quad (8)$$

Macierz Z informuje o liczbie iskier każdej indywidualnej działki komutatora dając tym samym przegląd lokalnego rozkładu iskier na obwodzie komutatora w cyklu pomiarowym. Zatem:

$$Z = \sum_{x=1}^K \sum_{k=1}^{10} (d_{K,Z,k} + d_{K,N,k}) = \sum_{x=1}^K (Y_{Zx} + Y_{Nx}) \quad (9)$$

Analogicznie wykorzystując zależność (8) można zdefiniować podobną macierz Z_S łączącą ważne liczby iskier każdej indywidualnej działki komutatora z intensywnością iskier:

$$\begin{aligned} [Z_S] &= [(Z_{1ZS} + Z_{1NS}), (Z_{2ZS} + Z_{2NS}), \dots, (Z_{KZS} + Z_{KNS})]^T = \\ &= \left[\sum_{k=1}^{10} k(d_{1Zk} + d_{1Nk}), \dots, \sum_{k=1}^{10} k(d_{KZk} + d_{KNk}) \right]^T = \\ &= \left[\sum_{k=1}^{10} (Y_{1ZS} + Y_{1NS}), \dots, \sum_{k=1}^{10} (Y_{KZS} + Y_{KNS}) \right]^T \end{aligned} \quad (10)$$

Macierz Z_S informuje o liczbie iskier o ważonej intensywności każdej indywidualnej działki komutatora w cyklu pomiarowym.

Sumując elementy dowolnego wiersza macierzy Z otrzymuje się liczbą iskier dowolnej x-tej działki w czasie cyklu pomiarowego T :

$$Y_x = \sum_{k=1}^{10} (d_{Z,x,k} + d_{N,x,k}) \quad (11)$$

Średnią częstość iskrzenia dowolnej działki w czasie cyklu pomiarowego można wyznaczyć z zależności:

$$Y'_x = \frac{1}{T \cdot n} \cdot Y_x \quad (12)$$

gdzie:

n – jest prędkością obrotową maszyny,
 T – jest czasem trwania cyklu pomiarowego.

Jeżeli liczbę iskier dowolnej działki x komutatora odniesie się do całkowitej liczby iskier jaka wystąpiła w czasie trwania cyklu pomiarowego, to otrzymuje się udział działki x w wytworzeniu iskier w cyklu pomiarowym

$$Q_x = \frac{Y_x}{Z} \quad (13)$$

przy czym:

$$\sum_{x=1}^K Q_x = 1$$

Analogicznie sumując elementy dowolnego wiersza macierzy Z_S otrzymuje się liczbę iskier o ważonej intensywności dowolnej działki komutatora w cyklu pomiarowym:

$$Y_{xS} = \sum_{k=1}^{10} k \cdot d_{x,k} \quad (14)$$

Umowną średnią intensywność iskry jednej dowolnej działki można zdefiniować zależnością:

$$Y_{xS}'' = \frac{Y_{xS}}{Y_x} \quad (15)$$

Natomiast

$$Q_{xS} = \frac{Y_{xS}}{Z} \quad (16)$$

jest miarą udziału jednej dowolnej działki w wytworzeniu sumarycznej liczby iskier o ważonej intensywności podczas trwania cyklu pomiarowego.

Średnia częstość iskrzenia wszystkich działek komutatora wyznaczona w czasie cyklu pomiarowego:

$$Z' = \frac{Z}{K \cdot T \cdot n} \quad (17)$$

Średnią intensywność iskry całego komutatora w cyklu pomiarowym można wyznaczyć:

$$Z_S'' = \frac{Z_S}{Z} \quad (18)$$

Korzystając z zależności (17) i (18) można analogicznie określić średnią intensywność

iskrzenia całego komutatora wyznaczoną w czasie cyklu pomiarowego:

$$Z_S' = Z' \cdot Z_S'' = \frac{Z_S}{K \cdot T \cdot n} \quad (19)$$

Pierwszy czynnik Z' w zależności (19) określa względne „obciążenie iskrowe” komutatora, drugi czynnik Z'' określa średnią intensywność iskry.

3. Wartości graniczne wskaźników

Korzystając z zależności (12) i (15) można wyznaczyć graniczne częstości iskrzenia dowolnej działki komutatora x w odniesieniu do wszystkich łączy działki z obserwowaną szczotką:

$$0 \leq Y_{xS}' = Y_x' \cdot Y_{xS}'' \leq 10 \quad (20)$$

ponieważ

$$0 \leq Y_x' = \frac{Y_x}{T \cdot n} \leq 1 \quad (21)$$

$$1 \leq Y_{xS}'' = \frac{Y_{xS}}{Y_x} \leq 10 \quad \text{przy } Y_x \neq 0 \quad (22)$$

Korzystając z zależności (13) oraz (15) można otrzymać ważne wartości graniczne udziału działki x w odniesieniu do całkowitej liczby iskier:

$$0 \leq Q_{xS} = Q_x \cdot Y_{xS}'' \leq 10 \quad (23)$$

ponieważ

$$0 \leq Q_x = \frac{Y_x}{Z} \leq 1 \quad (24)$$

$$\text{oraz} \quad 1 \leq Y_{xS}'' = \frac{Y_{xS}}{Y_x} \leq 10 \quad \text{przy } Y_x \neq 0 \quad (25)$$

Średnią częstość iskrzenia wszystkich działek komutatora można wyznaczyć korzystając z zależności (17) oraz (19):

$$0 \leq Z_S' = Z' \cdot Z_S'' \leq 10 \quad (26)$$

ponieważ zgodnie z zależnością (17) Z' zawiera się w przedziale:

$$0 \leq Z' = \frac{Z}{K \cdot T \cdot n} \leq 1 \quad (27)$$

oraz zgodnie z (19) przy założeniu, że $Z \neq 0$

$$0 \leq Z_s'' = \frac{Z_s}{Z} \leq 10 \quad (28)$$

Przedstawiona powyżej analiza matematyczna oraz zaproponowana metoda pomiarowa daje możliwość względnego zobiektywizowania oceny jakości komutacji.

Pozostaje nadal brak bezwzględnego wyskalowania wskaźników wyznaczonych powyższą metodą. Można obejść ten brak stosując indywidualne wyskalowanie odnoszące się każdorazowo do konkretnej maszyny poprzez takie odstrojenie biegunów komutacyjnych, przy którym uzyskuje się obserwowane iskrzenie o przypisanym mu stopniu [2,7].

Można wyznaczyć doświadczalnie korelację między wskaźnikiem iskrzenia zdefiniowanym jako średnia ważona intensywności iskier a umownym subiektywnym wskaźnikiem iskrzenia według norm. Najprościej jest dostosować skalę do iskrzenia występującego przy umyślnym rozstrojeniu biegunów komutacyjnych (np. stopień 3 wg norm). W świetle wstępnych doświadczeń dalekich jeszcze od końcowych wniosków wydaje się, że liniowa skala iskrzenia wg norm zachodnich (stopnie od 0 do 5) lepiej odpowiada skali średniej ważonej intensywności iskier całego komutatora (uzyskanej z analizatora iskrzenia) aniżeli nieliniowej skali wg norm polskich (stopnie od 1 do 3).

4. Literatura

- [1]. Paszek Wł., Zieliński W.: *Tests of dc machine commutation performed with a spark analyzer in comparison to the results of computer simulation of current waveforms in commutation coils.*(in Polish) XXVII Sympozium Maszyn Elektrycznych str.50 – 58. Gdańsk 1991.
- [2]. Zielińska M., Zieliński W.: *Determination of electromagnetic interference forming at the brush-commutator contact in direct current machines by means of a method based on luminous spark emission.* Electromagnetic Devices and Processes in Environment Protection the Second International Conference str. 257 - 261. Nałęczów – 1997.
- [3]. Zielińska M., Zieliński W.: *Metoda określania zakłóceń elektromagnetycznych powstających na styku szczotka-komutator w maszynach prądu stałego opierająca się na emisji iskier świetlnych, matematyczne wskaźniki iskrzenia.* VII Sympozjum Środowiskowe PTZE. Zastosowania elektromagnetyzmu w nowoczesnych technikach i technologiach. Krasnoblód 1997.

[4]. Zielińska M., Zieliński W.: *Determination of electromagnetic interference forming at the brush-commutator contact in direct current machines by means of a method based on luminous spark emission* str.93 - 96. Proceedings of seminar on electrical engineering "BESKIDY 97", Conference Archives vol.4, 1997.

[5]. Zieliński W.: *Monitorowanie iskrzenia styku szczotka komutator w maszynach prądu stałego za pomocą opto-elektronicznego analizatora iskrzenia.* Maszyny elektryczne. Zeszyty problemowe 2003. Katowice 2003.

[6]. Zieliński W.: *Symulacja przebiegu prądów w zewojach komutujących przy zasilaniu wygładzonym oraz pulsującym prądem twornika.* Maszyny elektryczne. Zeszyty problemowe 2004. Katowice 2004.

[7]. Zieliński W.: *Metoda monitorowania styku szczotka-komutator przy pomocy optoelektronicznego analizatora iskrzenia w maszynach komutatorowych prądu stałego.* Pomiary Automatyka Kontrola nr.3. Warszawa 2005.