

**Włodzimierz Zieliński**  
**Politechnika Lubelska, Lublin**

## **BŁĘDY W POMIARACH PROCESÓW ISKRZENIOWYCH KOMUTATOROWYCH MASZYN PRĄDU STAŁEGO**

### **THE ERRORS IN THE MEASUREMENT OF D.C. COMMUTATOR MACHINES SPARKING PROCESSES**

**Abstract:** The computer system connection with a sparking analyser enabled the evaluation of the brush-commutator sparking junction in reference to a particular portion of the commutator. To assess the sparking some mathematical indicators were applied, which reflect light signals. The measurements results of the conducted research are always different from the real figures. The physical figures measurements are capable to establish only the estimates which contain errors. In this article an attempt to a discussion of the errors committed at conducting the measurements by means of the opto-electronic method was presented.

#### **1. Wstęp**

Sprzęgnięcie systemu komputerowego wspomagającego proces pomiarowy z analizatorem iskrzenia opracowanym przez autora [6], umożliwiło zbudowanie zespołu wskaźników oceny iskrzenia poszczególnych działek komutatora poprzez obliczenia prostych wartości średnich sygnałów świetlnych lub ważonych wartości średnich.

Do oceny iskrzenia zastosowano szereg wskaźników matematycznych przetwarzających otrzymane sygnały świetlne powstające na styku szczotka-komutator, a odnoszące się do iskrzenia wszystkich, a także poszczególnych działek komutatora [2], [3], [4], [5].

Wskaźniki odnoszą się do przetwarzanych sygnałów świetlnych przez czujniki optoelektroniczne, a odzwierciedlających intensywności iskrzenia powstających iskier na styku nabiegającej, względnie zbiegającej krawędzi działki komutatora. Wyniki pomiaru podczas przeprowadzanych doświadczeń, zawsze różnią się od ich prawdziwych wartości, a pomiary wielkości fizycznych pozwalają określić tylko przybliżone ich wartości i są obarczone błędem.

#### **2. Klasyfikacja błędów**

Wyróżnia się trzy zasadnicze źródła powstawania błędów w trakcie wykonywania pomiarów:

- ograniczoność zmysłów osoby przeprowadzającej pomiar,
- określona niedokładność stosowanych przyrządów pomiarowych,
- zmienność warunków otoczenia.

Staranność osoby wykonującej pomiar i jakość użytych przyrządów przesądzają o dokładności otrzymanych wyników.

Wyniki fizyczne wyznaczane są bezpośrednio na podstawie wykonywanych pomiarów i w sposób pośredni. Wszystkie pomiary wielkości fizycznych sprowadzają się ostatecznie do pomiarów bezpośrednich.

Niezależnie od tego czy wielkość wyznaczona jest bezpośrednio czy pośrednio, różni się ona od wartości prawdziwej, a wielkość tej różnicy stanowi błąd pomiaru.

Różnicę między wartością  $x_j$  danej wielkości wyznaczoną z pomiaru, a wartością prawdziwą wyznaczonej wielkości  $x_0$  określa się błędem bezwzględnym pomiaru:

$$\Delta x = x_j - x_0 \quad (1)$$

gdzie:  $j = 1, 2, 3, \dots, n$  oznacza numer kolejny pomiaru.

Gdy nieznana jest wartość prawdziwa wyznaczonej wielkości,  $x_0$  oznacza średnią arytmetyczną wielkości z dużej liczby pomiarów. Wielkość błędu bezwzględnego nie charakteryzuje niedokładności dokonanego pomiaru.

Wyobrażenie o niedokładności pomiaru może wykazać dopiero stosunek błędu bezwzględnego do wartości prawdziwej lub średniej arytmetycznej mierzonej wielkości:

$$\delta = \frac{x_j - x_0}{x_0} \quad (2)$$

Błąd względny można także wyrazić w procentach:

$$\delta = \frac{x_j - x_0}{x_0} 100\% \quad (3)$$

W ten sposób można obliczyć błąd względny popełniony w danym pomiarze, charakteryzujący liczbowo lub procentowo dokładność zmierzonej wielkości.

O warunkach pomiaru można się dowiedzieć porównując wartość błędu względnego z błędem względnym maksymalnym do popełnienia w danych warunkach. Błąd względny na podstawie definicji jest liczbą oderwaną, określającą jaką część wielkości mierzonej stanowi wartość błędu bezwzględnego.

Podczas pomiarów mogą powstać błędy grube. Występują podczas zastosowania niewłaściwych lub uszkodzonych przyrządów oraz mylnego odczytu wskazania przyrządu, mylnego zapisu lub pomyłki w obliczeniach. Wyniki pomiarów obciążone błędem grubym odrzuca się i nie uwzględnia ich w wyliczeniu średniej arytmetycznej.

Błędy systematyczne są to takie błędy pomiaru, które powtarzają się w trakcie dokonywania pomiarów w tych samych warunkach lub zmieniają się według określonej funkcji wraz ze zmianą warunków.

Błędy przypadkowe są to takie błędy zmieniające się w sposób nieprzewidywany, mimo dostrzegania zmian uwarunkowań zewnętrznych. Są to błędy niewielkie powstające wskutek nakładania się zmian parametrów urządzeń pomiarowych i uwarunkowań zewnętrznych. Błędy te wynikają z niedoskonałości ludzkich zmysłów i niestałości warunków zewnętrznych. Są one zdarzeniami posiadającymi pewną wartość, która ulega zmianom losowym, a wartość ulegającą takim zmianom nazywamy zmienną losową.

Wartością najbardziej prawdopodobną podczas wykonywania pomiarów jest średnia arytmetyczna wyników serii pomiarów, wykonana z jednakową dokładnością. Podczas przeprowadzania doświadczeń mamy zawsze do czynienia ze skończoną liczbą pomiarów, dla których możemy obliczyć jedynie wartość średnią  $\bar{x}$ , jako przybliżoną wartość prawdziwą. Wówczas odchylenie standardowe  $\sigma_r$  określa błąd przypadkowy pojedynczego pomiaru, a jego wartość nie zależy od liczby pomiarów danej serii,

a tylko od własności mierzonego obiektu i warunków w jakich jest wykonywany pomiar [2], [5], [6], [7]:

$$\sigma_r = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (4)$$

gdzie:  $j = 1, 2, \dots, n$  jest liczbą pomiarów.

### 3. Badania eksperymentalne

Analiza niedokładności toru pomiarowego optoelektronicznego [1], służącego do selekcji iskier ze względu na intensywność iskrzenia (poziom ich mocy optycznej), jest złożona symulacyjnie i eksperymentalnie, ponieważ niemożliwe jest wygenerowanie lub symulowanie iskry o znanej gęstości widmowej mocy optycznej w miejscu jej powstawania na styku szczotki i działki komutatora.

Tor pomiarowy w analizatorze iskrzenia potraktowano jako dwa niezależne bloki :

1. Tor optyczny transmitujący część mocy optycznej iskry leżącą w widmie zespołu kolimator-światłowod-fotoelement, przetwarzaną na napięcie w odbiorniku fotoelektrycznym.
2. Układ analogowy, dokonujący zakresowej komparacji napięcia będącego funkcją intensywności iskry z równomiernymi przedziałami, pozwalający na dyskretyzację danej iskry do jednej z dziesięciu klas.

Oba elementy toru poddano badaniom w celu określenia ich niedokładności. Wyznaczono charakterystykę przetwarzania toru optycznego składającego się z monochromatycznego źródła mocy w postaci lasera o znanej charakterystyce  $P = f(I)$  i łącza optycznego, którego kolimator umieszczono w takiej odległości od czoła lasera, jaka odpowiada usytuowaniu w rzeczywistych warunkach, zamocowania w okolicy styku szczotka-komutator czujników optoelektronicznych. Na podstawie charakterystyki mocy optycznej na wyjściu światłowodu, jako funkcji prądu sterującego laserem, zmierzonej miernikiem mocy oraz niezależnego pomiaru napięcia na wyjściu fotoelementu, przy stałej temperaturze lasera, oszacowano niedokładność pomiaru mocy za pomocą łącza optoelektronicznego.

Dla układu komparatorów okienkowych obliczono niedokładność odwzorowania progów napięć dla układu decyzyjnego, na podstawie parametrów źródła napięcia wzorcowego zasilającego siatkę rezystorów, ich tolerancji, współczynnika temperaturowego i parametrów zastosowanych komparatorów (napięcie niezrównoważenia).

Ze względu na przypadkowy charakter błędów toru optycznego przetwarzającego na napięcie intensywność iskry leżącą w jego widmie transmisyjnym, określono wynik pomiaru z uwzględnieniem niepewności dla założonego poziomu ufności, przeprowadzając serię  $n=50000$  pomiarów dla każdej działki komutatora.

Ocenę niedokładności statycznej charakterystyki pomiarowego toru optoelektronicznego przeprowadzono korzystając z metody polegającej na wykorzystaniu modułu laserowego ze stabilizacją temperatury, zasilanego z regulowanego źródła prądowego o wydajności  $I_p$ , pozwalającego na zmianę mocy lasera w jego liniowym obszarze pracy, umieszczonego w stałej odległości od kolimatora, odpowiadającej rzeczywistym warunkom pomiaru intensywności iskry [8].

Teoretyczną charakterystykę statyczną toru przedstawia równanie:

$$P_{wy} = l_1 \cdot l_2 \cdot P_{lasera} \quad (5)$$

gdzie:  $P_{wy}$  jest mocą optyczną zmierzona na wyjściu światłowodu, współczynnik  $l_1$  obrazuje straty rozproszeniowe toru oraz wartość kąta pod jakim ustawiony jest kolimator względem osi optycznej lasera,  $l_2$  obrazuje przetwarzanie mocy optycznej na sygnał elektryczny w mierniku mocy.

W eksperymencie oceny niedokładności charakterystyki statycznej toru optoelektronicznego wartość prądu  $I_p$  modułu laserowego HL78016 zmierzono za pomocą multimetru HP34401A o niedokładności  $\pm(0.0020\% \text{ RDG} + 0,0006 \text{ FS})$ , moc optyczną zmierzono za pomocą miernika mocy MC2501 o niedokładności równej  $\pm 3\% \text{ FS}$ , zmierzono także, za pomocą multimetru HP wartość napięcia na wyjściu detektora (fotoelementu) toru optoelektronicznego.

Otrzymana charakterystyka przetwarzania toru optoelektronicznego ma postać:

$$P_{wy} = C1 + C2 \left( \frac{C3 I_p}{T} \right) \quad (6)$$

gdzie:  $C1, C2, C3$  są stałymi wyznaczonymi eksperymentalnie.

Rozbieżność pomiędzy charakterystyką mocy lasera w funkcji prądu uzyskaną z danych producenta, a charakterystyką eksperymentalną wyniosła  $\pm 3,5\%$ .

Eksperyment potwierdził przydatność otwartego łącza optycznego do transmisji mocy optycznej iskry.

Napięcie wyjściowe toru optoelektronicznego będące funkcją intensywności iskry jest porównywane z równomiernie rozstawionymi napięciami odniesienia wyznaczającymi przedziały mocy optycznej iskry dla układu decyzyjnego kwalifikującego je do jednej z 10 klas iskrzenia. Uwzględniając stabilność napięcia odniesienia, tolerancje i parametry termiczne siatki rezystorowej wyznaczającej progi dla komparatorów okienkowych o danym napięciu niezrównoważenia, obliczona niedokładność określenia progów dla danej klasy wyniosła 0.01% pełnej szerokości okna.

Wartość oczekiwaną intensywności iskry, reprezentowaną przez wartość oczekiwaną napięcia na wyjściu fotoelementu, pochodzącej z danej działki komutatora, estymującą wartość pomiarową  $u_x$  (mezurand) wyznaczono na podstawie serii  $n_p = 50000$  pomiarów napięcia:

$$\bar{U} = \left( \frac{\sum_{i=1}^n U_i}{n} \right) \quad (7)$$

zaś estymatę odchylenia standardowego wartości oczekiwanej wyznaczono z zależności:

$$S(\bar{U}) = \frac{S(u)}{\sqrt{n}} \quad (8)$$

gdzie:  $S(u)$  jest estymatą odchylenia standardowego pomiaru napięcia daną zależnością:

$$S(u) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (U_i - \bar{U})^2}{n - 1}} \quad (9)$$

natomiast:  $U_i$  wartością napięcia na fotoelementie w  $i$ -tym pomiarze.

Do przedstawienia niepewności pomiaru mocy przyjęto poziom ufności równy 99,7% (co odpowiada  $3\sigma$  przedziałowi niepewności dla rozkładu normalnego zmiennej losowej), więc wynik pomiaru mocy iskry, reprezentowany przez napięcie na wyjściu fotoelementu, dla danej działki komutatora, zawiera się w granicach:

$$u_x = \bar{U} \pm 3S(\bar{U}) \quad (10)$$

gdzie:  $x$  jest numerem działki komutatora. Największa zarejestrowana wartość niepewności dla działki komutatora wyniosła  $\pm 5\%$  wartości napięcia fotoelementu (dla działki komutatora emitującej iskry o największej intensywności w cyklu pomiarowym).

#### 4. Podsumowanie

Wyniki pomiarów uzyskanych podczas przeprowadzanych doświadczeń zawsze różnią się od ich prawdziwych wartości, a pomiary wielkości fizycznych pozwalają określić tylko wartości przybliżone.

Wyznaczenie statycznej charakterystyki przetwarzania toru optoelektronicznego za pomocą dobranego typu lasera, o znanej zależności mocy od prądu sterującego, pracującego w stałej temperaturze, pozwoliło na określenie parametrów optycznego toru rejestratora parametrów iskry. Nieliniowość całkowita toru stanowi 3% wartości zakresu.

Długość fali zastosowanego lasera (HL78016) była podyktowana dążeniem do wyznaczenia charakterystyki statycznej toru optoelektronicznego dla tej części widma mocy optycznej iskry, w której występuje maksimum.

Dynamikę toru zbadano sterując laser impulsami prądowymi o amplitudzie odpowiadającej maksimum jego mocy.

Błędy dynamiczne były zauważalne dopiero dla impulsów prądu o częstotliwości wielokrotnie większej od częstotliwości pojawiania się iskier na komutatorze (wynikającej z prędkości obrotowej silnika i liczby wycinków komutatora).

#### 5. Literatura

- [1]. Otomański P.: *Właściwości metrologiczne diody laserowej jako przetwornika sygnału w torze pomiarowym*. Rozprawa doktorska, Politechnika Poznańska, Poznań 1996.
- [2]. Zieliński W.: *Komputernye algoritmy dlja ocenki iskrenija, registriremogo s pomoszczju optoelektronnogo analizatora iskrenija* „Energetyka” 4/2005. Mińsk.
- [3]. Zieliński W.: *Technical-economic and mathematical estimations of flash processes in collectors of direct-current electric machines*. Aktualni problemi ekonomiki. Nr. 1(67), 2007.
- [4]. Zieliński W.: *Mathematical analysis of sparking in d.c. machines*. Archives of electrical engineering. VOL. LVI, No.1, Warszawa 2007.
- [5]. Zieliński W.: *Analiza procesów iskrzenia w maszynach komutatorowych prądu stałego w oparciu o matematyczne wskaźniki iskrzenia*. Branżowy Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Komel, Maszyny Elektryczne, Zeszyty problemowe Nr 77/2007, Katowice – maj 2007 r.
- [6]. Zieliński W.: *System diagnostyki procesów iskrzeniowych elektrycznych maszyn komutatorowych prądu stałego*. Polska Akademia Nauk. Seria Wydawnicza Postępy Napędu Elektrycznego i Energoelektroniki t.55, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2007.
- [7]. Zieliński W.: *Diagnostyka komutatorów maszyn elektrycznych prądu stałego*. Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Komel, Maszyny Elektryczne, Zeszyty problemowe Nr 81/2009, Katowice – maj 2009.
- [8]. Zieliński W.: *System diagnostyki komutatorów maszyn elektrycznych prądu stałego*. Napędy i sterowanie. Miesięcznik Naukowo Techniczny Nr 11 (127), grudzień 2009.