

Eksploatacja hutniczych napędów prądu stałego o dużych mocach

Streszczenie. W artykule przedstawiono problematykę eksploatacji komutatorowych maszyn elektrycznych prądu stałego o mocach od około 2 MW do ponad 8 MW, które są na wyposażeniu hutniczych linii walcowniczych wyrobów stalowych, aluminiowych i miedzianych. Zaprezentowano schematy zasilania dla napędów wielomaszynowych i jednomaszynowych z wykorzystaniem tyrystorowych przekształtników typu 6T włączonych do obwodów wzbudzeń. Problematyka eksploatacji układów napędowych jest wielowątkowa. W artykule zawężono jej przedstawienie do opisanie zjawiska komutacji oraz doboru i akceptacji stanu izolacji na podstawie trzech wskaźników: DAR, PI oraz DD. Opracowano w formie tabelarycznej objawy i przyczyny iskrzenia komutatorowych maszyn elektrycznych prądu stałego.

Abstract. The article presents the issue of operating DC commutator electric machines with power ratings ranging from approximately 2 MW to over 8 MW, which are used in rolling mill lines for steel, aluminum, and copper products. Power supply diagrams are presented for multi-machine and single-machine drives, utilizing 6T-type thyristor converters connected to the excitation circuits. The operational challenges of drive systems are multifaceted. Therefore, the focus was narrowed to the description of the commutation phenomenon and the selection and acceptance of insulation condition based on three indicators: DAR, PI, and DD. Symptoms and causes of sparking in DC commutator electric machines are developed in tabular form. (**Operation of high-power direct current drives in metallurgical plants.**)

Słowa kluczowe: silnik prądu stałego, komutacja, pomiary stanu izolacji.
Keywords: DC motor, commutation, insulation condition measurements.

Wstęp

Silniki napędowe w liniach technologicznych przeróbki plastycznej hut stali i metali nieżelaznych stanowią obiekty z reguły o dużych mocach jednostkowych rzędu kilku MW. Dynamiczny rozwój hutnictwa w Polsce w drugiej połowie ubiegłego wieku, wymuszał konieczność stosowania w określonych obszarach technologicznych napędów elektrycznych z możliwością efektywnej regulacji prędkości obrotowych. Takie właściwości wówczas posiadały maszyny prądu stałego, które można sterować od strony wirnika oraz wzbudzenia. Najczęściej do napędów walcarek stosowane były układy wielomaszynowe Leonarda o dużych mocach i niskich prędkościach obrotowych. Rozwój techniki półprzewodnikowej doprowadził w wielu przypadkach do ich modernizacji poprzez eliminację generatorów maszynowych zastępując je tyrystorowymi przekształtnikami DC, sześć- lub dwunastopulsowymi. W wielu walcowniach stali oraz metali nieżelaznych, szczególnie tam gdzie moce jednostkowe napędów nie były zbyt duże, zamieniano silniki DC na silniki AC zasilane z przemienników częstotliwości. Niestety do obecnych czasów w wielu hutach nadal pracują napędy prądu stałego w konfiguracji układu Leonarda. Często są to maszyny wyprodukowane w latach sześćdziesiątych XX wieku w zakładach byłego Związku Radzieckiego. Regulację w pierwszej strefie prędkości obrotowych silników walcarek uzyskuje się w torze wzbudzenia prądu generatora z wykorzystaniem mostków tyrystorowych typu 6T. Zwiększenie prędkości obrotowych powyżej nominalnych wartości realizowane jest w drugiej strefie regulacji poprzez obniżenie strumienia magnetycznego silnika napędowego (zmniejszenie prądu wzbudzenia silnika z wykorzystaniem mostków tyrystorowych typu 6T). Układy wielomaszynowe przedstawione na rysunkach 1, 2, 5 i 6 charakteryzują się niską sprawnością energetyczną, lecz z uwagi na stosunkowo wysokie koszty modernizacji są one bardzo często nadal eksploatowane. W czasie wieloletniej eksploatacji dużych zespołów napędowych następuje stopniowe zużycie maszyn, głównie uszkodzenia uzwojeń stojana i wirnika oraz komutatora a także podzespołów mechanicznych, szczególnie łożysk, sprzęgieł i wałów przenoszących moment napędowy. Pogorszenie stanu

technicznego napędu z reguły doprowadza do awarii, przerwy w produkcji i dodatkowych kosztów remontu maszyn elektrycznych. Z tych oto powodów, tak ważna jest diagnostyka eksploatacyjna maszyn, która pozwala wykryć uszkodzenie w początkowym stadium rozwoju i uniknąć kosztownej awarii poprzez odpowiednio wczesne wykonanie oględzin i przeglądów napędu elektrycznego [6].

Monitorowanie pracy napędu i jego diagnostyka mogą być realizowane w sposób:

- ciągle (on-line),
- okresowy,
- inspekcyjny w określonych sytuacjach [6, 25].

W praktycznej diagnostyce maszyn i urządzeń w warunkach przemysłowych występuje wiele problemów utrudniających ocenę stanu technicznego. Bardzo często awarie pojawiają się w różnych okresach eksploatacji, niejednokrotnie bez żadnych wcześniejszych symptomów sygnalizujących jakiegokolwiek rozbieżności parametrów układu izolacyjnego czy elektromagnetycznego. W prezentowanym artykule, z uwagi na bardzo rozległy zakres przedmiotowy, to zawężono zasady eksploatacji maszyn DC pod kątem zapewnienia prawidłowej komutacji oraz poprawnego stanu izolacji uzwojeń stojana i wirnika dla napędów pracujących w środowisku hutniczym.

Dane techniczne napędów DC dla różnych typów walcarek

Zasadnicze parametry techniczne silników i generatorów stosowanych w różnego rodzaju napędach walcowniczych hut stali i metali nieżelaznych zestawiono w tabeli 1.

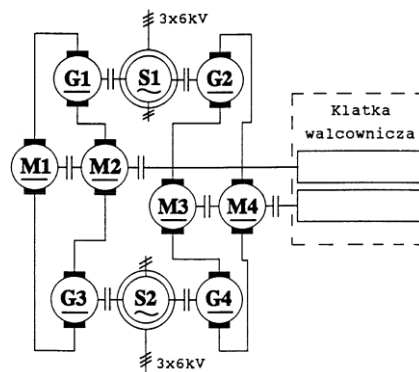
Tab. 1. Parametry techniczne hutniczych napędów DC

Typ napędu	Parametry techniczne
Napęd klatki walcowniczej blach grubych (rys. 1, rys. 2)	$P_{M1} = P_{M2} = P_{M3} = P_{M4} = 3250 \text{ kW};$ $U_N = 730 \text{ V}; I_{MN} = 4780 \text{ A};$ $n_{MN} = 55 \text{ obr/min.}$
	$P_{G1} = P_{G2} = P_{G3} = P_{G4} = 4150 \text{ kW};$ $U_N = 730 \text{ V Y}; I_{GN} = 5670 \text{ A};$ $n_{GN} = 500 \text{ obr/min}$
	$S_1 = S_2 = 8600 \text{ kVA};$ $U_N = 3 \times 6 \text{ kV}; I_{S1N} = I_{S1N} = 828 \text{ A};$ $n_{SN} = 500 \text{ obr/min}; \cos \varphi = 0,85$

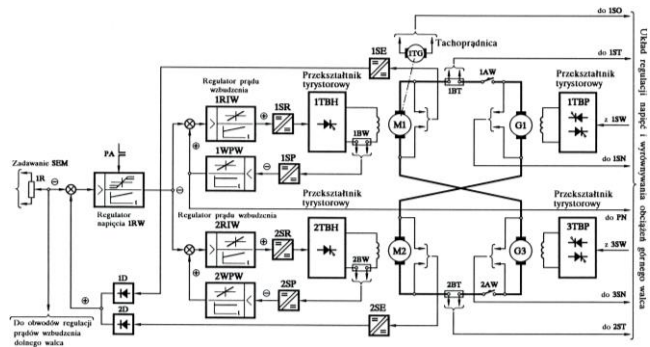
Napędy walcarek rur: pielgrzym (1) i alongator (2) (rys. 3)	$P_{M1} = 1900 \text{ kW}; U_{N1} = 750 \text{ V}; I_{M1} = 2750 \text{ A}; n_{N1} = 50 \text{ obr/min}; S_{T2} = 3500 \text{ kVA}; 6/0,34/0,41 \text{ kV/kV/kV}; Y/y0/d11$
	$P_{M2} = 1600 \text{ kW}; U_{N2} = 750 \text{ V}; I_{M2} = 2270 \text{ A}; n_{N2} = 200 \text{ obr/min}; S_{T2} = 2600 \text{ kVA}; 6/0,3/0,36 \text{ kV/kV/kV}; D/y1/d0$
Napęd walcarki kształtowników (rys. 4)	$P_M = 2040 \text{ kW}; U_N = 750 \text{ V}; I_M = 2900 \text{ A}; n_{N1} = 86/135 \text{ obr/min}; S_{TR} = 3500/1786/1715 \text{ kVA}; 6/0,378/0,363 \text{ kV/kV/kV}; Y/y0/d11; I_{2TR} = 2728Y/2841\Delta/A$
Napęd walcarki aluminium (rys. 5, rys. 6)	$P_{M1} = P_{M2} = 2200 \text{ kW}; U_N = 750 \text{ V}; I_{MN} = 3140 \text{ A}; n_{MN} = 120/280 \text{ obr/min}$
	$P_{G1} = P_{G2} = 2200 \text{ kW}; U_N = 750 \text{ V}; I_{GN} = 2930 \text{ A}; n_{GN} = 750 \text{ obr/min}$
	$S_{SS} = 5750 \text{ kVA}; P_{SS} = 5000 \text{ kW}; U_N = 3 \times 6 \text{ kV}; I_{SSN} = 554 \text{ A}; n_{SN} = 750 \text{ obr/min}; \cos \varphi = 0,9$
	$P_{WZ} = 63 \text{ kW}; U_{NWZ} = 163 \text{ V}; I_{NWZ} = 386 \text{ A}; n_{NWZ} = 750 \text{ obr/min};$
Napęd walcarki miedzi (rys. 7, rys. 8)	$P_{MDC} = 1800 \text{ kW}; U_{NMDC} = 1100 \text{ V}; I_{MDC} = 1630 \text{ A}; n_{NDC} = 900 \text{ obr/min}$
	$P_{MAC} = 2000 \text{ kW}; U_{NMAC} = 690 \text{ V}; I_{MAC} = 1981 \text{ A}; n_{NAC} = 894 \text{ obr/min}$

Uzupełnieniem tabeli 1 są odpowiednie schematy połączeń elektromechanicznych i energoelektronicznych (rys. 1, rys. 3, rys. 4, rys. 5, rys. 7 i rys. 8) a także systemy sterowania w obwodach wzbudzeń (rys. 2, rys. 5 i rys. 6). Napędy klatek walcowniczych prądu stałego realizowane były, i są nadal, w dwóch kategoriach jako: układy wielomaszynowe z podwójnie sprzężonymi mechanicznie silnikami DC (rys. 1 i rys. 5) oraz pojedynczymi silnikami DC (rys. 3, rys. 4 i rys. 7) połączonymi poprzez przekładnie mechaniczne z wałem roboczym walcarki. W układach wielomaszynowych Leonarda można rozróżnić bezpośrednie połączenie wału wolnoobrotowego silnika DC z wałem walcarki blach grubych (rys. 1) lub połączenie mechaniczne dwóch silników DC o znacznie większych prędkościach obrotowych poprzez jedną przekładnię mechaniczną z wyprowadzonymi dwoma wałami roboczymi do sprzęgnięcia z dolnym i górnym wałem walcarki aluminium (rys. 5). Z punktu widzenia eksploatacji, sprzęgnięcie mechaniczne dwóch silników na jeden wał roboczy pozwala zapewnić ciągłość pracy walcarki w warunkach awaryjnych poprzez zmniejszenie wartości momentu gniotu. W układach napędowych z jednym silnikiem DC wykorzystywane są rewersyjne mostki tyrystorowe 6T w obwodach tworników - przykład walcarki prętów miedzi (rys. 7). Inne rozwiązanie przedstawiono na rysunku 3 gdzie napędy walcarek stalowych rur bezszwowych, tj. silnik walcarki pielgrzymowej M1 i silnik alongatora M2 zasilane są z dwunastopulsowych przekształtników 6T+6D podłączonych do trójzwojeniowych transformatorów Tr1 i Tr2 o układach połączeń Y/y0/d11 i D/y1/d0 w celu ograniczenia generacji wyższych harmonicznych prądów do przemysłowej sieci elektroenergetycznej. Niezależnie od naturalnych środków redukujących harmoniczne, podłączone są dwie gałęzie filtrów pasywnych L-C, które jednocześnie kompensują moc bierną dla składowej podstawowej. Ciekawy napęd z silnikiem DC

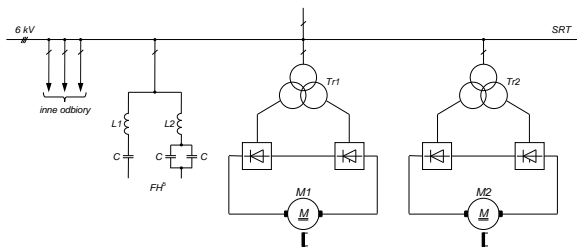
zaimplementowany został w przypadku walcarki kształtowników stalowych (rys. 4). Zwiększenie prędkości obrotowej silnika powyżej wartości nominalnej następuje przez osłabienie strumienia magnetycznego - regulacja prądu wzbudzenia z wykorzystaniem przekształtnika PT5. Zmianę kierunku wirowania realizuje się poprzez sekwencyjne sterowanie mostka tranzystorów IGBT T1-T3 lub T2-T4. Twornik silnika tej walcarki zasilany jest z układu przekształtników dwunastopulsowych przyłączonych do obwodów wtórnych transformatora trójzwojeniowego TR ($\Delta/Y/\Delta$). Powoduje to naturalne obniżenie negatywnego oddziaływania napędu na jakość napięcia w punkcie wspólnego zasilania. Na rysunku 8 przedstawiono napęd walcarki prętów miedzi z przemiennikiem częstotliwości typu DTC i silnikiem asynchronicznym klatkowym o zbliżonej mocy jak dla silnika DC (tab. 1). Prezentowany układ napędowy AC jest wynikiem modernizacji napędu z silnikiem DC wg schematu z rysunku 7. Istotną różnicą polega na ograniczeniu poboru mocy biernej oraz redukcji wyższych harmonicznych poprzez właściwy dobór pasywnych filtrów rezonansowych L-C. Wielomaszynowe układy napędowe, w których sterowanie odbywa się z udziałem przekształtników tyrystorowych zasilających obwody wzbudzeń generatorów DC oraz silników DC, przedstawione zostały na dwóch schematach - rysunek 2 i rysunek 6. Ich struktury regulacyjne są podobne, jedyna różnica polega na implementacji sprzętowej. W systemie napędowym walcarki blach zastosowane są niezależne przekształtniki tyrystorowe 6T w autonomicznych obwodach wzbudzeń (rys. 2), w odróżnieniu od walcarki aluminium, w której jeden przekształtnik tyrystorowy 6T zasila równolegle dwa obwody wzbudzeń silników napędowych DC (rys. 6). Podobnie w tym układzie jest z zasilaniem równoległym obwodów wzbudzeń generatorów G1 i G2 z jednego przekształtnika tyrystorowego (rys. 6).



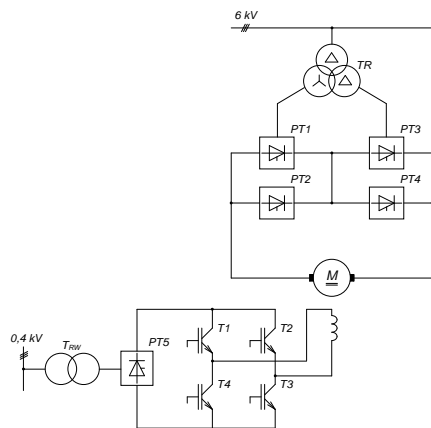
Rys. 1. Schemat poglądowy napędu głównego klatki walcowniczej blach grubych



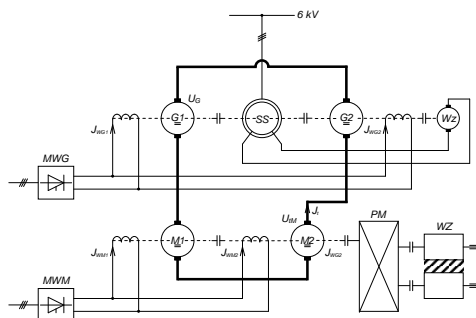
Rys. 2. Schemat sterowania napędem walców blach grubych



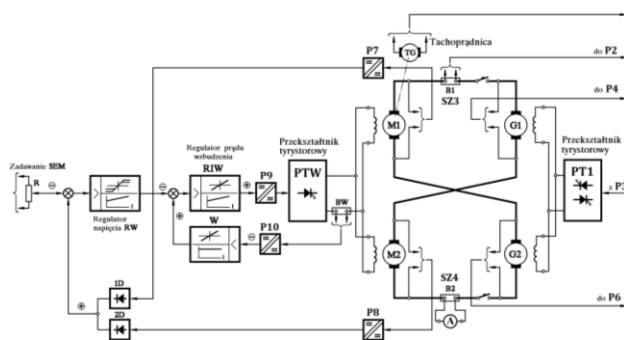
Rys. 3. Układ zasilania napędów walcarek rur: pielgrzymowej (M1) i alongatora (M2)



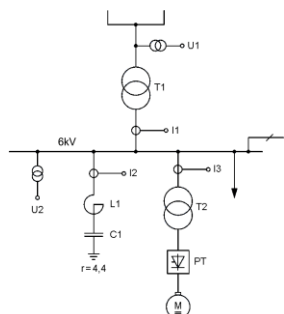
Rys. 4. Schemat zasilania napędu walcarki kształtowników



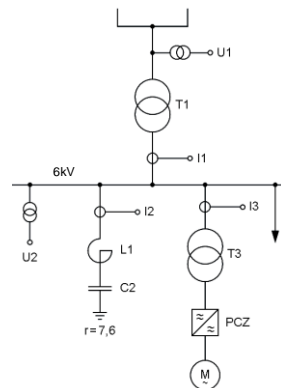
Rys. 5. Schemat poglądowy zasilania walcarki aluminium



Rys. 6. Schemat sterowania napędem walcarki zimnej aluminium



Rys. 7. Schemat zasilania walcarki prętów miedzi z silnikiem DC



Rys. 8. Schemat zasilania walcarki prętów miedzi z silnikiem AC

Zagadnienia związane z eksploatacją napędów z silnikami DC dużej mocy

Eksploatację silników elektrycznych prowadzi się w oparciu o Rozporządzenie MKiŚ z dnia 22.03.2023 r. [16]. Pomocne w tym celu mogą też być, obecnie nie obowiązujące, Zarządzenie MGMIp z dnia 28.02.1987 r. w sprawie szczegółowych zasad eksploatacji elektrycznych urządzeń napędowych [23]. Na tej bazie, w zasadzie opracowuje się zakładową instrukcję eksploatacji elektrycznych urządzeń napędowych zatwierdzoną przez pracodawcę. Analizowane układy Leonarda prądu stałego wraz z silnikami synchronicznymi oraz indywidualne silniki DC stosowane do napędów walcarek w przemyśle hutniczym ze względu na swoją moc i napięcie (silnik synchroniczny zasilany z sieci 6 kV) należą do I grupy. Zgodnie z instrukcją eksploatacji do obowiązków osób obsługujących silniki tej grupy należy:

1. uruchamianie i zatrzymywanie urządzeń,
2. kontrola warunków chłodzenia,
3. kontrola temperatury silnika,
4. kontrola drgań i hałasów silnika,
5. kontrola łożysk (stopień nagrzania, natężenia hałasu),
6. obserwacja aparatury kontrolno-pomiarowej,
7. obserwacja pracy szczotek na komutatorze i pierścieniach ślizgowych,
8. obserwację stanu komutatora,
9. obserwację stanu pierścieni ślizgowych silnika synchronicznego,
10. utrzymywanie w czystości silnika i urządzeń pomocniczych,
11. utrzymywanie we właściwym stanie urządzeń zapewniających bezpieczeństwo przeciwporażeniowe i pożarowe,
12. prowadzenie zapisów w dzienniku eksploatacji,
13. zgłaszanie zakłóceń,
14. udział w przeprowadzaniu oględzin w czasie postoju silnika.

Jak widać katalog zagadnień eksploatacyjnych jest bardzo szeroki i trudno w jednym opracowaniu wszystko uwzględnić. Jako szczególnie ważne, uznano zagadnienia komutacji oraz właściwy stan parametrów izolacyjnych.

Problematyka komutacji w maszynach DC

Od czasów pojawienia się maszyn prądu stałego do czasów współczesnych, komutacja jest jednym z centralnych problemów związanych z zasadami prawidłowej eksploatacji. Wynika to stąd, że na krawędzi zestyku ślizgowego szczotka komutator często pojawia się iskrzenie, które przy określonej intensywności może wpływać szkodliwie na powierzchnie styczne zarówno szczotki, jak i komutatora, co z kolei prowadzi do dalszego gwałtownego wzrostu iskrzenia. Intensywne iskrzenie przechodzi w łuk (plazmę) palący się w obszarze

komutatora. W roku 1884 w ramach patentu niemieckiego nr 34465 (06.12.1884 r.) Menges [11] zaproponował sposób poprawienia komutacji poprzez zastosowanie biegunów pomocniczych zwanych komutacyjnymi. Rozważania teoretyczne na temat zjawiska komutacji były i są przedmiotem wielu publikacji w książkach akademickich np. [2, 4, 6, 15] oraz w monografiach i artykułach naukowych [8, 9, 12, 22]. Działający w osi szczotek przepływ oddziaływania twornika powoduje, że indukcja jest równa zero nie w osi poprzecznej, lecz w strefie przesuniętej względem niej o pewien kąt α . Podczas pracy prądnicowej następuje przesunięcie osi neutralnej w kierunku wirowania twornika, a przy pracy silnikowej w kierunku przeciwnym. Występująca w osi poprzecznej indukcja magnetyczna oddziaływania twornika indukuje w zwartych przez szczotki zezwojach komutujących napięcie rotacji. Napięcie to powoduje przepływ znacznego prądu w tych zezwojach, co jest przyczyną występowania iskrzenia pod szczotkami. Dlatego w celu zlikwidowania tych niekorzystnych skutków oddziaływania twornika na warunki komutacji, w strefie komutacyjnej pomiędzy biegunami głównymi umieszcza się dodatkowe bieguny zwane pomocniczymi lub komutacyjnymi. Zadaniem ich jest kompensacja szkodliwego wpływu oddziaływania twornika w strefie komutacyjnej poprzez wytworzenie w tej strefie pola o przeciwnej biegunowości i wartości proporcjonalnej do prądu twornika. Uzwojenie biegunów pomocniczych musi być zatem zasilane prądem twornika i wytwarzać przepływ odpowiednio większy od przepływu oddziaływania twornika w strefie komutacyjnej. W maszynach prądu stałego dużej mocy umieszcza się ponadto uzwojenie kompensacyjne, którego podstawowym zadaniem jest likwidacja skutków oddziaływania twornika w strefie biegunów głównych (osłabienie strumienia wzbudzenia). Należy zaznaczyć, że uzwojenie kompensacyjne oprócz przepływu działającego pod biegunami głównymi wytwarza także przepływ o stałej wartości działający w strefie komutacyjnej i współdziałający z polem wytwarzanym przez bieguny komutacyjne poprzez częściową kompensację przepływu oddziaływania twornika w tej strefie. Na jakość procesu komutacji mają znaczenie dynamika prądu obciążenia oraz wpływ zmian prądu wzbudzenia silnika lub generatora DC [4, 8, 9]. W eksploatowanej maszynie należy tak ustawić strefę obojętną, aby napięcie między krańcami szczotek było niewiele większe niż 10 V [4], jeżeli chcemy aby maszyna również i przy zmieniających się szybko obciążeniach pracowała nienagannie. Z powyższych względów należy traktować tę wartość jako miarę odporności maszyny przeciw iskrzeniu przy zmianach lub nagłych wahanach obciążenia.

Zmniejszenie strumienia wzbudzenia $\varphi_w(t)$ powoduje zawsze zwiększenie prądu twornika $i_{tw}(t)$. Wzrost prądu twornika $i_{tw}(t)$ powoduje pogorszenie się warunków komutacji, co skutkuje zmniejszeniem obciążalności prądowej silnika [1]. Konsekwencją tego jest zmniejszenie się momentu obrotowego generowanego przez taki silnik zgodnie z zależnością:

$$(1) \quad M_e(t) = k_m \cdot \Phi_w(t) \cdot i_{tw}(t).$$

Z punktu widzenia dynamiki, regulacja prędkości obrotowej poprzez zmianę napięcia wzbudzenia ma charakter układu trzeciego rzędu [1]. Osłabienie strumienia wzbudzenia zwiększa w kwadracie stałą elektromechaniczną T_M (2) oraz odwrotnie proporcjonalnie współczynnik tłumienia ζ (3):

$$(2) \quad T_M = \frac{J \cdot R_{tw}}{k_e \cdot k_m \cdot \Phi_w^2(t)},$$

$$(3) \quad \zeta = \xi_N \cdot \frac{\Phi_{wN}}{\Phi_w},$$

natomiast proporcjonalnie częstotliwość własną ω_0 (4):

$$(4) \quad \omega_0 = \omega_{0N} \cdot \frac{\Phi_w}{\Phi_{wN}}.$$

Z analizy modelu matematycznego silnika prądu stałego regulowanego od strony wzbudzenia wynika, że przyrost prądu ma trzy składowe, co można przedstawić za pomocą transmitancji:

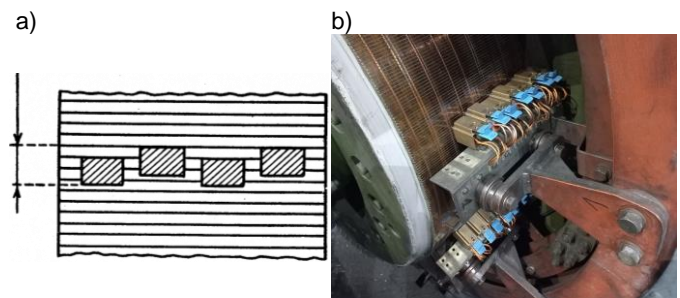
$$(5) \quad G_1(s) = \frac{i_{tw}(s)}{M_0(s)} \text{ - od przyrostu obciążenia;}$$

$$(6) \quad G_2(s) = \frac{i_{tw}(s)}{U(s)} \text{ - od zmiany napięcia zasilania;}$$

$$(7) \quad G_3(s) = \frac{i_{tw}(s)}{M_e(s)} = \Phi_{wN} \frac{i_{tw}(s)}{\Phi_w(s)} \text{ - od zmiany momentu}$$

elektromagnetycznego, wynikającej ze zmienionej wartości strumienia. Tego typu regulacja wymaga stosowania adaptacyjnego regulatora prędkości silnika DC. Asymetria pola magnetycznego występująca wraz z głębokim odwzbudzeniem, niewątpliwie może spowodować przestawienie strefy neutralnej, a w przypadku słabo dotartych szczotek, w konsekwencji może doprowadzić do znacznego iskrzenia, aż do objęcia łukiem elektrycznym całego obwodu komutatora.

Ograniczenie iskrzenia na komutatorze maszyny prądu stałego występuje przy zbliżaniu się do przebiegu prostoliniowego w zezwoju komutującym, które można osiągnąć zwiększając ilości zwartych działek komutatora przez szczotkę o odpowiedniej szerokości. W niektórych przypadkach poprawę komutacji, szczególnie dla maszyn dużej mocy, można osiągnąć poprzez rozszerzenie strefy komutacyjnej lub zastosowanie szerszych szczotek [5]. Aby rozszerzyć strefę komutacyjną, wskazane jest rozmieszczenie w każdym trawersie szczotki w kształcie szachownicy, co przedstawiono na rysunku 9a [5] i 9b.



Rys. 9. a) Rozszerzenie strefy komutacyjnej poprzez rozłożenie szczotek [5]; b) Fotografia ułożenia szczotek na trawersie przylegającej do komutatora

Praktyczne zasady eksploatacji maszyn komutatorowych DC w zakresie ograniczenia przyczyn iskrzenia zostały zestawione w tabeli 2.

Tab. 2. Zbiornicze zestawienie objawów i przyczyn iskrzenia w silnikach prądu stałego

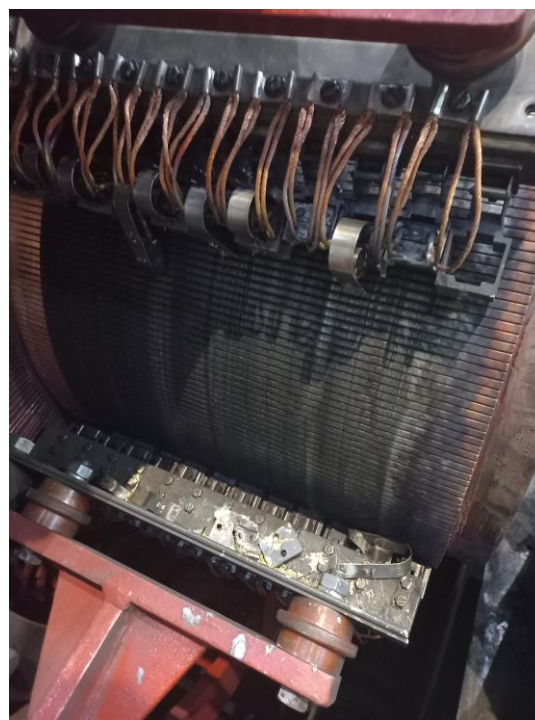
Opis objawów (O) i przyczyn (P) iskrzenia	
1.O	Szczotki „tańczą” w oprawach, drgania powodują obrywanie linek i kruszenie szczotek
1.P	1. Nieodpowiedni gatunek szczotek - zjawisko występuje w większym nasileniu przy biegu jałowym. 2. Na komutatorze olej, brud, pył węglowy.

	<p>3. Na powierzchni szczotek pozostałości po papierze ściernym.</p> <p>4. Oprawy szczotek luźne lub wyrobione, luzy szczotek zbyt wyrobione.</p> <p>5. Oprawy ustawione niewłaściwie (skośne stoją zgodnie z kierunkiem wirowania, promieniowo nie prostopadle).</p> <p>6. Mika wystaje ponad działki.</p> <p>7. Komutator nierówny (nie cylindryczny).</p> <p>8. Nadmierne ścieranie komutatora przez szczotki</p> <p>9. Komutator luźny.</p>
2.O	Niektóre szczotki silnie iskrzą i nagrzewają się, pozostałe są zimne.
2.P	<p>1. Szczotki niejednakowego gatunku.</p> <p>2. Niejednakowy nacisk na szczotki.</p> <p>3. Różne oporności między szczotkami i przewodami.</p>
3.O	<p>Nadmierne iskrzenie szczotek:</p> <p>a) na krawędzi schodzącej z działek;</p> <p>b) na krawędzi wchodzącej na działki;</p> <p>c) zielone perliste;</p> <p>d) wyciągające się lub ogień na komutatorze.</p>
3.P	<p>1. Niejednakowe odległości między szczotkami na obwodzie komutatora (a, b);</p> <p>2. Bieguny komutacyjne zbyt silne (b, c);</p> <p>3. Bieguny komutacyjne zbyt słabe (a, c);</p> <p>4. Na komutatorze olej, brud, pył węglowy (a);</p> <p>5. Przeciążenie maszyny (a, b);</p> <p>6. Wstrząsy przy pracy maszyny (a, b);</p> <p>7. Uszkodzenie uzwojenia wirnika, zwarcie między wycinkami (a, b);</p> <p>8. Niejednakowa oporność między grupami szczotek a szyną zbiorczą (a, b);</p> <p>9. Nacisk szczotek niewłaściwy lub niejednakowy (a, b);</p> <p>10. Własności polerownicze szczotek zbyt małe (a);</p> <p>11. Szczotki pokrywają zbyt dużą liczbę wycinków (a,b);</p> <p>12. Szczotki pokrywają zbyt małą liczbę wycinków (a,b);</p> <p>13. Oprawy promieniowo zmontowane nie prostopadle do komutatora (a, b);</p> <p>14. Szczotki zakleszczają się w oprawach (a, b);</p> <p>15. Wyrobione oprawy, luzy szczotek w oprawach zbyt duże (a, b);</p> <p>16. Rozluźnione zamocowanie opraw (a, b);</p> <p>17. Poluzowane niektóre śruby mocujące linki szczotek (a, b);</p> <p>18. Oprawy ustawione nierówno (a, b);</p> <p>19. Mika wystaje (a, d);</p> <p>20. Komutator nie cylindryczny (bije) (a, b);</p> <p>21. Przerwane miejsca lutowania przy komutatorze (a, b);</p> <p>22. Wycinki (działki - lamele) luźne, wystają lub wgłębione (a, b);</p> <p>23. Nierówności na komutatorze (a, b);</p> <p>24. Zwarcie szczotek (d).</p>
4.O	<p>Niewłaściwe zużycie szczotek:</p> <p>a) szczotki zdzierają się zbyt szybko,</p> <p>b) niejednakowe ścieranie szczotek, niejednakowe obciążenie prądowe szczotek,</p> <p>c) szczotki kruszą się, występuje wylutowanie linek, niejednakowe obciążenie prądowe szczotek.</p>
4.P	<p>1. Pył lub piasek w powietrzu (a);</p> <p>2. Różne gatunki szczotek (b, c);</p> <p>3. Oprawy szczotek luźne (b, c);</p> <p>4. Nierównomierne rozłożenie szczotek (a);</p> <p>5. Poza tym przyczyny jak w punkcie 3.P dla:</p> <p>(a) oznaczone podpunktami: 4, 5, 6 i 9;</p> <p>(b) oznaczone podpunktami: 5, 8, 9, 10, 14, 17+19;</p> <p>(c) oznaczone podpunktami: 5, 8, 9, 10, 14, 17.</p>
5.O	<p>Niewłaściwe zużycie komutatora:</p> <p>a) ścieranie komutatora duże - komutator czarny,</p> <p>b) ścieranie komutatora duże - komutator gładki, barwa komutatora - normalna,</p>

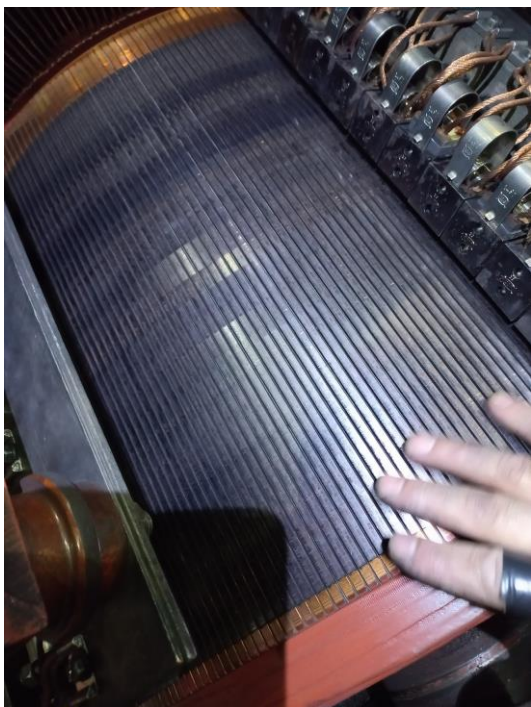
	<p>c) komutator porysowany, powyżłabiany,</p> <p>d) komutator nierówny (bije),</p> <p>e) komutator ma plamy.</p>
5.P	<p>1. Nacisk szczotek zbyt duży (b, c, d);</p> <p>2. Własności polerownicze szczotek zbyt duże (b, c);</p> <p>3. Poza tym przyczyny jak w punkcie 3.P dla:</p> <p>(a) oznaczone podpunktami: 6, 9, 17 i 19,</p> <p>(c) oznaczone podpunktami: 9,</p> <p>(d) oznaczone podpunktami: 9, 10,</p> <p>(e) oznaczone podpunktami: 5, 6, 7, 9, 10, 11, 12, 19+23.</p> <p>4. Poza tym przyczyny jak w punkcie 4.P dla:</p> <p>(c) oznaczone podpunktami: 1,</p> <p>(e) oznaczone podpunktami: 1, 2.</p>
6.O	<p>Nadmierne nagrzewanie:</p> <p>a) komutatora, szczotek,</p> <p>b) opraw szczotkowych.</p>
6.P	<p>1. Wyżarcia w materiale komutatora (a, b);</p> <p>2. Oprawy skośne, stoją niewłaściwie (z biegiem komutatora);</p> <p>3. Poza tym przyczyny jak w punkcie 3.P dla:</p> <p>(a) oznaczone podpunktami: 4, 6, 9, 13 i 19.</p> <p>4. Poza tym przyczyny jak w punkcie 5.P dla:</p> <p>(a) oznaczone podpunktami: 1 i 2.</p> <p>5. Poza tym przyczyny jak w punkcie 3.P dla:</p> <p>(b) oznaczone podpunktami: 9, 14 i 17.</p>

Oceny warunków komutacji w maszynie prądu stałego można dokonać poprzez wzrokowe określenie stopnia iskrzenia występującego pomiędzy szczotką i komutatorem w procesie komutacji. Opis poszczególnych stopni przywoływany jest w wielu publikacjach i podręcznikach m.in. [3, 4, 7]. W Polsce normy wyróżniają 5 stopni iskrzenia (1, 1 ¼, 1½, 2, 3), w Ameryce 10 stopni.

Udokumentowaniem negatywnych objawów związanych ze zjawiskiem komutacji są dwie poniższe fotografie ilustrujące stan komutatora na skutek wadliwego procesu iskrzenia na styku komutator - szczotki.



Fot. 1. Uszkodzone i zerwane sprężyny spiralne dociskające szczotki, widok na osmoloną powierzchnię komutatora



Fot. 2. Widoczne wżery, różny docisk szczotek (stopień iskrzenia 3)

Problematyka izolacji maszyn DC

Właściwie dobrana izolacja odporna na ciepło, szczególnie w silniku komutatorowym prądu stałego ma zasadnicze znaczenie w aspekcie jej trwałości oraz zapewnienia zadawalających parametrów eksploatacyjnych. W silnikach i generatorach elektrycznych, w tym również prądu stałego, istnieją w zasadzie dwa systemy izolacji. Pierwsza to izolacja, która oddziela uzwojenia (wimnika, biegunów głównych, biegunów komutacyjnych, biegunów kompensacyjnych, komutatora oraz przewodów łączących) od masy silnika, który jest uziemiony. Drugim systemem izolacji jest wzajemne oddzielenie przewodów nawojowych względem siebie tworząc tzw. izolację zwojową. Ze statystyk wynika, że ok. 80% usterek elektrycznych przypada na degradację izolacji zwojowej a pozostałe 20% stanowią przebicia między cewkami a masą silnika. W materiałoznawstwie elektrotechnicznym, z uwagi na maksymalne temperatury pracy urządzeń, stosowana izolacja dzieli się na sześć klas. Przekroczenie maksymalnej temperatury przy pracy ciągłej skraca żywotność izolacji (prawo Montsinger'a mówi, że zmniejszenie temperatury roboczej o 8°C powoduje dwukrotny wzrost trwałości izolacji [14]).

Do oceny stanu izolacji stosuje się właściwie obecnie trzy wskaźniki [20, 21, 26]:

1) współczynnik absorpcji *DAR* określane jako:

$$(8) \quad DAR = \frac{R_{60}}{R_{15}},$$

gdzie:

R_{60} – rezystancja zmierzona po 60 sekundach od chwili przyłożenia napięcia;

R_{15} – rezystancja zmierzona po 15 sekundach od chwili przyłożenia napięcia.

2) wskaźnik polaryzacji *PI* będący ilorazem wartości rezystancji izolacji zmierzonych po 10 i 1 minucie:

$$(9) \quad PI = \frac{R_{10min}}{R_{1min}},$$

gdzie:

R_{10min} – rezystancja zmierzona po 10 minutach od chwili przyłożenia napięcia;

R_{1min} – rezystancja zmierzona po 1 minucie od chwili przyłożenia napięcia.

Pomiar wskaźnika polaryzacji izolacji jest szczególnym przypadkiem pomiaru rezystancji izolacji w ściśle określonym czasie, bez konieczności stosowania korekcji temperaturowej. Z uwagi na niezależność od temperatury ten sposób oceny stanu izolacji ma ogromną przewagę nad pomiarem punktowym.

3) Wskaźnik rozładowania dielektryka *DD* (ang. *Dielectric Discharge*) [25] – pomiar rozładowania dielektryka *DD* jest stosunkowo nową metodą badania stanu izolacji.

Pomiar ten jest próbą diagnostyczną, pozwalającą ocenić stopień degradacji izolacji, na skutek zesterzenia się materiału oraz obecnością wtrącin gazowych w jego izolacji. Rezultaty pomiaru zależą od charakterystyki rozładowania układu izolacyjnego, to znaczy że badany jest stan wewnątrz materiału dielektryka, niezależnie od zanieczyszczeń powierzchniowych.

Procedura badań w pierwszym kroku wymaga wstępnego ładowania napięciem stałym przez odpowiedni czas – najczęściej 30 minut [25]. Po stwierdzeniu całkowitego naładowania i spolaryzowaniu dielektryka potwierdzającym istnienie jednej drogi pomiaru upływu prądu przez izolację, należy przeprowadzić proces rozładowania. W trakcie rozładowywania składowa pojemnościowa prądu opada bardzo szybko, w wyniku małej stałej czasowej obwodu rozładowania [s]. Drugą składową stanowi prąd absorpcji, który zanika znacznie wolniej ze względu na dużo większą stałą czasową rozładowania, sięgającą kilku minut, najczęściej jednak około jednej minuty. Po tym czasie należy dokonać pomiaru prądu rozładowania oraz pojemności układu izolacyjnego [25]. Znając wartości: napięcia probierczego, prądu absorpcji oraz pojemności układu izolacyjnego, wskaźnik *DD* obliczany jest z zależności:

$$(10) \quad DD = \frac{I_{1min}}{U \cdot C},$$

gdzie:

I_{1min} – wartość prądu w [mA] zmierzona po 1 minucie od rozpoczęcia rozładowywania izolacji;

U – napięcie pomiarowe w [V];

C – pojemność badanego układu izolacyjnego w [F].

W wielowarstwowych układach izolacyjnych uszkodzenie jednej z warstw może nie wpłynąć znacząco na obniżenie wartości rezystancji izolacji. Takie stan awaryjny najczęściej jest niewykrywalny w normalnych pomiarach rezystancji izolacji oraz podczas wyznaczania współczynników *DAR* i *PI*. Jedynie pomiar współczynnika *DD* może ujawnić przepływ nadmiernego prądu absorpcyjnego, co może mieć miejsce podczas uszkodzenia lub zanieczyszczenia jednej z warstw wielowarstwowego układu dielektrycznego.

W prezentowanych tabelach 3 ÷ 5 zestawiono kryterialne oceny stanu izolacji. Przedstawione wartości wskaźników są dostępne w bogatej literaturze poświęconej diagnostyce izolacji maszyn elektrycznych [3, 6, 7, 10, 13, 19, 21, 24, 25, 20, 17, 18] ale także transformatorów, kabli i innych instalacji oraz urządzeń elektrycznych.

Tab. 3. Zalecane wartości wskaźnika *DAR* w zależności od temperatury

Temperatura °C	20	40	60
Wskaźnik <i>DAR</i>	≥1,5	≥1,4	≥1,3

Tab. 4. Minimalne wartości wskaźników PI oraz temperatur dla sześciu klas izolacji

Klasa izolacji	A	E	B	F	H	C
Maksymalna temperatura trwale dopuszczalna	105	120	130	155	180	220
Maksymalny przyrost temperatury uzwojeń dla $T_{ot} = 40^{\circ}\text{C}$, wg IEC61558 i EN60726	60	75	80	100	125	150
Minimalna wartość wskaźnika PI przy stałej temperaturze pomiaru	1,5	1,6	2,0	2,0	2,0	>2

Tab. 5. Kryterialne wartości wskaźników do ocena stanu izolacji maszyn elektrycznych

Stan izolacji	Wskaźniki		
	PI	DAR	DD
Zły	<1,2	<1	> 7
Niejasny, wątpliwy	1,3 ÷ 1,9	1 ÷ 1,4	4 ÷ 7
Dobry	2 ÷ 4	1,4 ÷ 1,6	<2
Doskonały	>4	>1,6	<1,5

Podsumowanie

Pomimo iż obecnie układy napędowe projektuje się z silnikami asynchronicznymi klatkowymi zasilanymi z przemienników częstotliwości, to jednak nadal funkcjonują jednostki napędowe o bardzo dużych mocach wyposażone w silniki prądu stałego. Stosowanie silników prądu stałego dużej mocy w połowie XX wieku były jedynym rozwiązaniem technicznym umożliwiającym płyną i stabilną regulację prędkości obrotowej. W artykule przedstawiono napędy z silnikami prądu stałego, które pracują w szeroko rozumianym przemyśle hutniczym. Należy zaznaczyć, że pod względem wartości mocy silnika prądu stałego mamy podobne instalacje dedykowane do górniczych maszyn wyciągowych. Szczególnie wielomaszynowe układy napędowe prądu stałego, zaprezentowane na rysunkach 1 i 5, należą do obiektów energochłonnych, a także kłopotliwych pod względem techniczno-eksploatacyjnym, generujących wysokie koszty utrzymania w ruchu ciągłym. Z uwagi na wysokie koszty modernizacyjne w kierunku zastąpienia ich maszynami asynchronicznymi, układy te są ciągle eksploatowane i remontowane. Jedną z najbardziej kłopotliwych cech maszyn prądu stałego jest właściwe ustawienie strefy neutralnej szczotek tak, aby zapewnić wyeliminowanie zjawiska iskrzenia.

Do katalogu zaleceń eliminujących przyczyny iskrzenia szczotek na komutatorze, można zaliczyć:

- 1) zadawalające parametry izolacji uzwojeń wirnika i stojana silników i generatorów prądu stałego (zalecane wartości wskaźników *DAR*, *PI* i *DD* - tab.3,4 i 5);
- 2) ustawienie strefy neutralnej na ułożonych i dotartych elektro-szczotkach do krzywizny komutatora;
- 3) sprawdzenie właściwego docisku szczotek do komutatora;
- 4) sprawdzenie dopuszczalnej gęstości prądu elektro-szczotek (często występuje brak niektórych szczotek - zob. rys. 9b i fot. 1, powodując wzrost gęstości prądu na pozostałych pracujących szczotkach);
- 5) ograniczenie dynamicznych zmian zwiększających moment obciążenia silnika, co w konsekwencji przekłada się na większe wartości prądów tworników generatorów i silników, które negatywnie wpływają na pogorszenie zjawiska komutacji. Zjawisko to występuje w stanach nieustalonych, kiedy czas narastania prądu twornika jest znacznie mniejszy niż czas narastania wartości strumienia pod biegunem komutacyjnym, z uwagi na szkodliwy wpływ prądów wirowych bieguna komutacyjnego wykonanego z litego żelaza. W stanie

nieustalonym powstaje różnica między chwilową a nominalną wartością strumienia. Aby zapewnić stałą wartość momentu elektromagnetycznego, silnik zostaje dociążony większym prądem twornika, co w rezultacie przekłada się na intensywne iskrzenie. Podobne zjawisko, lecz o znacznie większym poziomie wzrostu wartości prądu twornika występuje w procesie odwzbudzenia silnika podczas regulacji w strefie gdy $n > n_N$. Jak potwierdzają liczne badania doświadczalne i przemysłowe [6, 7, 8], obniżenie prądu wzbudzenia niekorzystnie wpływa na iskrzenie szczotek w obszarze komutatora, doprowadzając do lokalnych zwarć, wżerów i przepaleń między działkami komutatora osiągając czasami 3 stopień iskrzenia (fot. 2).

- 6) dbałość o poprawnie sprzęgnięte maszyny: prądnice z silnikiem synchronicznym (rys. 1 i rys. 5) oraz silniki napędowe z przekładnią (rys. 5) lub wałem roboczym - (rys. 1) (dociśnięte i spasowane zamki w półsprzęgłach, elastyczne tuleje w półsprzęgłach), stosowanie elastycznych sprzęgieł mieszkowych do tachoprądnicy (rys. 2 i rys. 6).

Z doświadczeń eksploatacyjnych układów napędowych z maszynami elektrycznymi wiadomo jest, że najwięcej postojów i awarii występuje na skutek uszkodzeń łożysk. Badania amerykańskie jak również polskie [20] wskazują, że ponad 40% awarii powstaje na skutek uszkodzeń łożysk. Niesprawne łożyska, drgania w osiach x-y-z zespołu napędowego mogą być również przyczyną pogorszenia zjawiska komutacji.

Prezentowany artykuł posiada w tytule słowo „eksploatacja”. W sferze eksploatacji zawiera się bardzo wiele zagadnień, które ze względu na obszerność merytoryczną nie mieszczą się w zakresie jednej czasopiśmienniczej publikacji. Autorzy są w pełni świadomi, iż nie poruszyli takich zagadnień jak: właściwy dobór i diagnostyka pracy łożysk, problemy smarowania, nagrzewania, drgań poszczególnych podzespołów napędowych, doboru systemu regulacji i kontroli, aparatury pomiarowej, odpowiednich zabezpieczeń elektrycznych i elektromechanicznych.

Autorzy: dr inż. Marek Gała, Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, ul. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, e-mail: marek.gala@pcz.pl; dr hab. inż. Kazimierz Jagiela, Częstochowski Oddział SEP, ul. Kopernika 16/18, 42-217 Częstochowa, e-mail: kazimierz.jagiela@gmail.com

LITERATURA

- [1] Biszyta K., Sterowanie i regulacja silników elektrycznych. WNT, Warszawa 1989
- [2] Dąbrowski M., Konstrukcja maszyn elektrycznych. WNT, Warszawa 1965
- [3] Drak B., Glinka T., Kapinos J., Miksiewicz R., Zientek P., Awaryjność maszyn elektrycznych i transformatorów w energetyce. INiME KOMEL, Katowice 2013
- [4] Dubicki S., Maszyny elektryczne. PWN, Warszawa 1965 [s. 286]
- [5] Гемке Р.Г., Неисправности электрических машин. Энергоатомиздат, Ленинград, 1989, ISBN 5-283-04431-9
- [6] Glinka T., Badania diagnostyczne maszyn elektrycznych w przemyśle. INiME KOMEL, Katowice 1998
- [7] Glinka T., Maszyny elektryczne i transformatory. Podstawy teoretyczne, eksploatacja i diagnostyka. INiME KOMEL, Katowice 2015
- [8] Glinka T., Własności komutacyjne maszyn prądu stałego przy pulsującym bądź szybko zmieniającym się prądzie twornika. *ZN Politechniki Śląskiej, seria: Elektryka*, Z. 44, Nr 414, Gliwice 1974
- [9] Glinka T., Diagnostyka izolacji uzwojeń maszyn elektrycznych dużej mocy. *ZN Politechniki Śląskiej, seria: Elektryka*, Z. 130, Nr 1184, Gliwice 1992, 9-22

- [10] Lisowski M., Pomiary rezystywności i przenikalności elektrycznej dielektryków stałych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2004
- [11] Muszalski Z., Teoria i fizyka komutacji maszyn elektrycznych. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1997
- [12] Nakamura S., Morita M., Quantitative evaluation of transient commutation of DC machine. *Electrical Engineering in Japan*, Vol. 108, No 4, 1988, 126-135
- [13] Olesz M., Kostro G., Pomiary rezystancji izolacji silników elektrycznych. *ZN Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej*, Nr 64/2019 (05.2019), 29-32
- [14] Pełczewski W., Zagadnienia cieplne w maszynach elektrycznych. PWT, Warszawa 1956
- [15] Plamitzer A.M., Maszyny elektryczne. WNT, Warszawa 1970
- [16] Rozporządzenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 22 marca 2023 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego (Dz. U. z 2023 poz. 819, z późn. zm.)
- [17] Przybysz J., Diagnostyka izolacji uzwojeń stojanów maszyn elektrycznych. *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych*, Politechnika Wroclawska, Studia i Materiały, Nr 21, Wrocław 2000
- [18] Subocz J., Szrot M., Płowucha J., Nowoczesne Metody diagnostyki izolacji silników i generatorów. *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne*, Nr 74/2006, 121-128
- [19] Szymaniec S., Diagnostyka eksploatacyjna uszkodzeń napędów elektrycznych w przemyśle – doświadczenia własne. *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne*, Nr 89/2011, 21-26
- [20] Szymaniec S., Diagnostyka stanu izolacji uzwojeń i stanu łożysk silników indukcyjnych klatkowych w warunkach przemysłowej eksploatacji. Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Studia i Monografie, Z. 193, Opole 2006
- [21] Szymaniec S., Plutecki Z., Praca maszyn elektrycznych w różnych warunkach mikro-klimatycznych. *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych*, Nr 66 Politechniki Wrocławskiej, Studia i Materiały, Nr 32 2012, 189-199
- [22] Tertil Z., Doświadczalne metody badania elektromagnetycznych i komutacyjnych własności maszyn prądu stałego, *Zeszyty Naukowe AGH, Elektryfikacja i Mechanizacja Górnictwa i Hutnictwa*, Nr 132, Kraków 1981
- [23] Zarządzenie Ministra Gospodarki Materiałowej i Paliwowej z dnia 28 lutego 1987 r. w sprawie szczegółowych zasad eksploatacji elektrycznych urządzeń napędowych (Monitor Polski z 1987 r., Nr 8, poz. 69)
- [24] Zientek P., Ocena wyników badań izolacji głównej maszyn elektrycznych napięciem stałym. *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 97, Nr 3/2021, 56-59
- [25] Zientek P., Łukaszewicz-Szmytka, W. Czempik G., Metody badań izolacji głównej maszyn elektrycznych dużej mocy przy wykorzystaniu napięcia stałego. *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne*, Nr 2/2019 (122), 27-34
- [26] Pomiary rezystancji izolacji, <https://bezel.com.pl/2018/08/01/pomiary-rezystancji-izolacji/> (26.02.2024)