

Badanie zjawiska zniekształceń stref magnetycznie obojętnych w lotniczych komutatorowych prądnicach prądu stałego

Streszczenie. W artykule omówiono zjawiska związane z powstawaniem zniekształceń linii magnetycznie obojętnych w lotniczych komutatorowych prądnicach prądu stałego. Przedstawiono przypadki przemieszczania się tych stref podczas wieloletniej eksploatacji statku powietrznego. Przedstawiono wyniki regulacji kilku kompletów prądnic prądu stałego GS-12T wraz z regulatorami napięcia RN-180M z samolotów Su-22, wykonanej według metodyki opracowanej w Instytucie Technicznym Wojsk Lotniczych.

Abstract. This article discusses the phenomena associated with the generation of the magnetically neutral line disturbances in aircraft commutator direct current generators. It presents examples of the displacement of these zones in the course of many years of aircraft operation. The paper includes the results of adjusting several sets of GS-12T direct current generator along with RN-180M voltage regulators for Su-22 aircraft, conducted as per the procedure developed at AFIT. (Studying the phenomenon of magnetically neutral zone distortion in aircraft commutator direct current generators)

Słowa kluczowe: diagnostyka techniczna, prądnicą prądu stałego, strefa neutralna magnetycznie, komutator.

Keywords: technical diagnostics, direct current generator, magnetically neutral zone, commutator.

Wstęp

W lotnictwie wojskowym obserwuje się dynamiczny rozwój w dziedzinie maszyn elektrycznych, który jest wynikiem pojawienia się nowoczesnych technologii i elektronicznych systemów zasilania. W wyniku tego, zamiast obecnie istniejących na pokładzie wojskowego statku powietrznego różnego typu systemów wytwarzania i rozdzielania energii (prądu stałego i przemiennego), stosuje się jeden tzw. system elektroenergetyczny. Systemy elektroenergetyczne (prądu stałego i przemiennego) wykorzystują różnorodność napięć tj. 405 VAC zmiennej częstotliwości, 200 VAC stałej częstotliwości oraz 28 VDC i 270 VDC prądu stałego [1]. Ze względu na bezpieczeństwo wzrost niezawodności, obniżenie kosztów jego eksploatacji oraz ograniczenie emisji szkodliwych substancji wpływających bezpośrednio na organizm ludzki odchodzi się od zabudowy na pokład współczesnego statku powietrznego instalacji zasilania prądu stałego.

Wychodząc naprzeciw tym trendom w lotnictwie wojskowym RP. (m.in. samolot myśliwsko-bombowy Su-22) nadal wykorzystuje się układy zasilania prądu stałego oparte na komutatorowych prądnicach prądu stałego [2, 3]. Zaletami tego układu są: współpraca z pokładową baterią akumulatorową, co ma duże znaczenie dla gotowości bojowej na lotniskach polowych z dala od infrastruktury naziemnej, współpraca podczas rozruchu tzn. prądnicą jako maszyna odwracalna może być użyta jako rozrusznik, a także możliwość współpracy buforowej czyli pobieranie energii z baterii akumulatorowej podczas przeciążenia prądnic, współpraca równoległa prądnic – nie trzeba synchronizować częstotliwości ani fazy. Zużycie mechaniczne w skrzynkach napędów prądnic pracujących równolegle nie zwiększa strat energetycznych. Do zalet układu zasilania prądu przemiennego należą: znaczna moc jednostkowa (z jednościami masy), regulacja napięcia – prosty układ regulacji kontrolujący tylko amplitudę mierzonego sygnału, brak efektu pojemnościowego podczas pracy w warunkach ustalonego (stałego) obciążenia ponieważ przy długich liniach przesyłowych prądu przemiennego lub wprowadzaniu przewodów elektrycznych przez rurki lub rynnę kablów dla prądu przemiennego powstają straty energii elektrycznej, gdzie jednocześnie występują efekty podbijania napięcia na końcu linii, brak efektów samowzbudzenia w warunkach ustalonego poziomu obciążenia oraz dopracowana technologia wytwarzania

prądnic prądu stałego umożliwiającą eksploatację w warunkach silnego zapylenia i zmiennych warunków atmosferycznych [3]. W zespołach prądnicowych prądu przemiennego zużycia mechaniczne mają duże znaczenie generując znaczne straty energii elektrycznej, a w skrajnych przypadkach uniemożliwiają synchronizację prądnic.

Budowa i zasada działania prądnic prądu stałego

W klasycznym ujęciu, prądnicę komutatorową prądu stałego i jej przebieg siły elektromotorycznej przedstawia się w postaci schematu jak na rysunku 1. Prądnicą komutatorową prądu stałego składa się z nieruchomego stojana, który można przedstawić jako pary magnesów stałych N i S (N – biegun północny, S – biegun południowy) wytwarzających stałe pole magnetyczne, o natężeniu B oraz wirnika obracanego zewnętrzną siłą mechaniczną z prędkością ω_2 . Na wirniku nawinięte są zwoje, w których indukuje się siła elektromotoryczna $e(t)$; którą można opisać zależnością:

$$(1) \quad e(t) = K_g \cdot B \cdot \omega_2 \cdot \sin \left[\int_0^t \omega_2(t) dt \right]$$

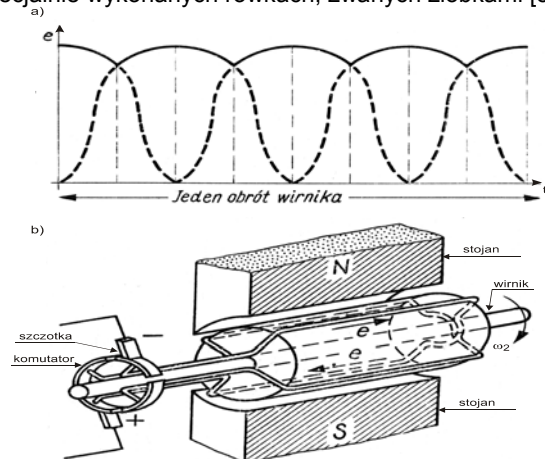
gdzie: K_g – współczynnik konstrukcyjny danej prądnic, B – indukcja magnetyczna, $\omega_2(t)$ – chwilowa prędkość kątowa wirnika prądnic, t – czas.

Komutator zamocowany jest na wirniku w postaci pierścienia wykonanego z materiału elektrycznie przewodzącego. Pierścień ten jest podzielony na segmenty, które są od siebie odizolowane elektrycznie i tworzą tzw. wycinki komutatora. Do każdego wycinka jest przyłączony koniec zwoju, gdzie komutator pełni funkcję mechanicznego prostownika prądu, szczotek elektrycznych „+” i „-”, które ślizgają się po klepkach komutatora. Komutator pełni rolę prostownika elektromaszynowego, gdzie na zaciskach wyjściowych prądnic otrzymuje się napięcie pulsacyjne. Przebieg tego napięcia można rozdzielić na dwie składowe:

- składową stałą,
- składową pulsacji.

Pulsacje (w postaci linii ciągłej) są synchronicznie związane z prędkością kątową wirnika prądnic [2, 4]. W celu zwiększenia wartości indukcji B układu się zwoje wirnika na rdzeniu wykonanym z pakietu blach krzemowych, uzyskując w ten sposób wzmocnienie wartości siły elektromotorycznej

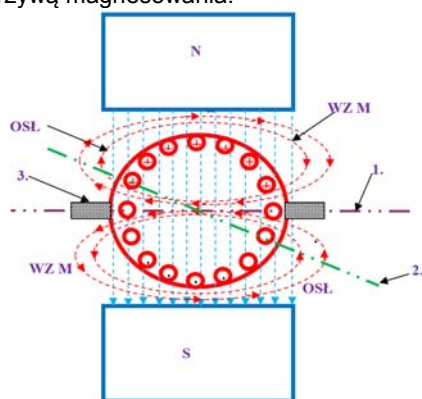
(SEM) około 10 000 razy. Aby zwoje na wirniku były dobrze mechanicznie związane z rdzeniem, układa się je w specjalnie wykonanych rowkach, zwanych żłobkami [5].



Rys. 1. Wirnik z dwoma zwojami i komutatorem o czterech wycinkach oraz wykres zmian siły elektromotorycznej między szczotkami prądnicy prądu stałego; a) przebieg składowych napięcia (siły elektromotorycznej SEM o wartości chwilowej e indukowanego w poszczególnych zewojach wirnika – tworzenie się pulsacji komutatorowej, b) widok ogólny prądnicy

Oddziaływanie wirnika – przemieszczanie się linii magnetycznie obojętnej

W praktyce wypadkowe z nałożenia się linii pola magnetycznego stojana (pole wypadkowe z nałożenia się linii pola magnetycznego stojana) ulegają lokalnym zagęszczeniom i rozrzedzeniom [4, 5, 6]. To zróżnicowanie lokalnych zmian bieguny komutacyjne i kompensacyjne mogą tylko częściowo złagodzić, tak więc już w czasie produkcji niezbędna jest pewna korekta przesunięcia szczotek. Wraz ze wzrostem prądu obciążenia wzrasta wartość natężenia prądu wirnika oraz natężenie prądu w uzwojeniu wzbudzenia, co powoduje zwiększenie natężenia pola magnetycznego w rdzeniu stalowym wirnika (twornika). i zwiększenie wartości indukcji magnetycznej B . Na rysunku 2 i 3 przedstawiono przesunięcie strefy magnetycznie obojętnej prądnicy komutatorowej prądu stałego spowodowane oddziaływaniem pola poprzecznego wirnika oraz krzywą magnesowania.



Rys. 2. Przesunięcie strefy magnetycznie obojętnej prądnicy komutatorowej prądu stałego; 1 – strefa magnetycznie obojętnej bez oddziaływania wirnika, 2 – strefa magnetycznie obojętnej przy oddziaływaniu wirnika, N, S – bieguny stojana prądnicy, WZM – strefa wzmocnienia pola magnetycznego stojana poprzez pole magnetyczne wirnika, OSL – strefa osłabienia pola magnetycznego stojana poprzez pole magnetyczne wirnika, 3 – szczotka komutacyjna

Konstruktorzy tak dobierają parametry eksploatacyjne maszyny i systemu jej obciążenia, aby mieściły się one

między punktami 2 i 3 tj. na charakterystyce liniowej krzywej $B = f(H)$. W tym zakresie są największe wartości przenikalności magnetycznej μ . Z uwagi na postępujące procesy starzeniowe zmienia się wartość μ , a więc zmianie ulega charakter zagęszczeń lokalnych linii sił pola magnetycznego w niektórych obszarach blach stalowych wirnika. Powoduje to lokalne zmiany natężenia pola magnetycznego w obszarach o silnym zagęszczeniu linii sił pola magnetycznego gdzie może dojść do lokalnego nasycenia tzn. do przesunięcia się na krzywej magnesowania – punkt pracy przemieści się z odcinka 2-3 do odcinka 3-4., co spowoduje to znaczące zmniejszenie rezystancji magnetycznej (reluktancji) R_{mk} określanej zależnością:

$$(2) \quad R_{mk} = \frac{l_k}{\mu_k \cdot S_k}$$

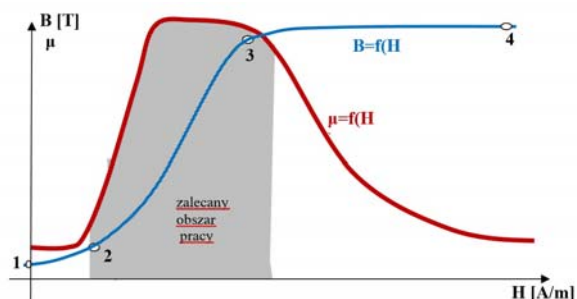
gdzie: l_k – długość odcinka obwodu magnetycznego nr k , μ_k – przenikalność magnetyczna dla odcinka obwodu magnetycznego nr k , S_k – pole powierzchni odcinka obwodu magnetycznego nr k .

Zróżnicowanie to powoduje osłabienie strumienia magnetycznego Φ stojana wytwarzanego przez uzwojenie wzbudzenia o liczbie zwojów z_w oraz natężeniu prądu I_w zgodnie z zależnością:

$$(3) \quad \Phi = \frac{\theta}{\sum_{k=1}^n R_{mk}}$$

gdzie: θ – siła magnetomotoryczna określana jest:

$$(4) \quad \theta = I_w \cdot z_w$$



Rys. 3. Krzywa magnesowania prądnicy komutatorowej prądu stałego; $B = f(H)$ – krzywa zmian indukcji magnetycznej w funkcji natężenia pola magnetycznego, $\mu = f(H)$ krzywa zmian przenikalności magnetycznej w funkcji natężenia pola magnetycznego, punkty na krzywej magnesowania: 1 – magnetyzm szczątkowy, 2 – początek stanu nasycenia, 3+4 – stan pełnego nasycenia

Dla obwodu magnetycznego zwiększeniu ulegnie strumień rozproszony przechodzący poprzez powietrze obok wirnika, pomiędzy biegunami stojana, co dodatkowo zmniejsza wartość strumienia magnetycznego oddziałującego na wirnik. Podczas eksploatacji następują liczne procesy starzeniowe prądnicy wpływające na przemieszczenie strefy magnetycznie obojętnej. Do głównych zjawisk należą: zmiana wartości przenikalności magnetycznej (blach stalowych obwodów magnetycznych wirnika, stojana, biegunów komutacyjnych i kompensacyjnych) powodujące lokalne rozpraszanie i wzmocnienie linii sił pola magnetycznego, zmiana średnicy komutatora powodująca zmianę warunków komutacji, a także zmiana położenia klepek komutatora względem

konstrukcji nośnej wnętrza wirnika spowodowane utlenianiem i korozją elektrochemiczną połączeń mechanicznych [5, 6, 7, 8]. Zalecane jest sprawdzenie bicia promieniowego komutatora na wymontowanym wirniku przy jego podgrzaniu do temperatury 100°C. Klepki komutatora (zwane wycinkami komutatora) w prądnicach są wykonane zwykle z brązu natomiast konstrukcję nośną wnętrza wirnika (zaciskowo utrzymujące wycinki komutatora) wykonano z aluminium. Oba te materiały mają znaczną różnicę potencjału elektrochemicznego, stąd możliwość jest intensyfikacja procesów korozji elektrochemicznej w warunkach podwyższonej wilgotności i temperatury.

Stan przejściowy w sieci prądu stałego i sposób jego oceny

Stan nieustalony zwany także przejściowym [6, 7, 8, 9] jest to stan, w którym występują zmiany sygnału wyjściowego na wyjściu układu zawierającego w swojej strukturze źródło energii. Stan trwa od momentu zmiany obciążenia energetycznego źródła energii do momentu ustalenia się wartości sygnału na wyjściu. Zmiana sygnału na wyjściu może przebiegać w postaci wykładniczej lub oscylacyjnej jak to ma miejsce w przypadku rysunku 4. Przebieg napięcia stanu nieustalonego może przybierać skomplikowane kształty co jest trudne do jego oceny jakościowej. W związku z tym napięcia stanu nieustalonego (impulsy napięciowe) przekształca się na ich równoważne funkcje skokowe tzw. impulsy zastępcze jak pokazano na rysunku 5. Impuls zastępczy ma to samo pole powierzchni i wartość napięcia co impuls rzeczywisty. Impuls zastępczy ma kształt prostokąta i ma krótszy czas trwania niż impuls rzeczywisty. Dla tak zdefiniowanych impulsów określono granice normatywne powinny się mieścić w wartościach granicznych [3, 8, 9] jak pokazano na rysunku 6 c).

Badania stanów przejściowych przeprowadza się w celu określenia zdolności układu zasilania elektrycznego do samoregulacji napięcia. W tym celu zmienia się obciążenie prądowe układu zasilania elektrycznego w celu wywołania impulsów:

a) przepięciowych tj. wykraczających powyżej górnego poziomu odniesienia $U = 29V$ – przy skokowym zmniejszeniu obciążenia prądowego, jak pokazano na rysunku 6 a),

b) zanikowych tj. niższych niż dolny poziom odniesienia $U = 24V$ – przy zwiększeniu obciążenia prądowego. Przy skokowym zwiększeniu obciążenia następuje obniżenie napięcia i powstaje impuls zanikowy, natomiast przy skokowym zmniejszeniu obciążenia następuje zwiększenie napięcia i powstaje impuls przepięciowy.

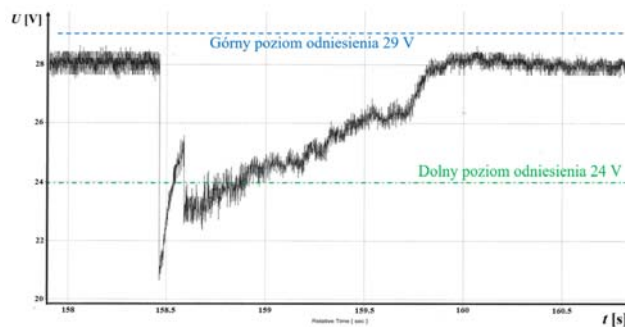
Na rysunku 4 i 5 pokazano przykład „pozytywnego” przebiegu napięcia w czasie wężła prądnicą przy skokowym zwiększeniu obciążenia oraz przykład „negatywny” przebiegu napięcia w czasie wężła prądnicą przy skokowym zwiększeniu obciążenia, gdzie A-B-C-D-E-F jest to krzywa przebiegu napięcia w stanie przejściowym, której pole powierzchni podlega całkowaniu i zamianie na impuls zastępczy. W tym celu zmienia się skokowo obciążenie wężła elektroenergetycznego:

a) od 5% do 85%, a następnie od 85% do 5% mocy układu zasilania elektrycznego.

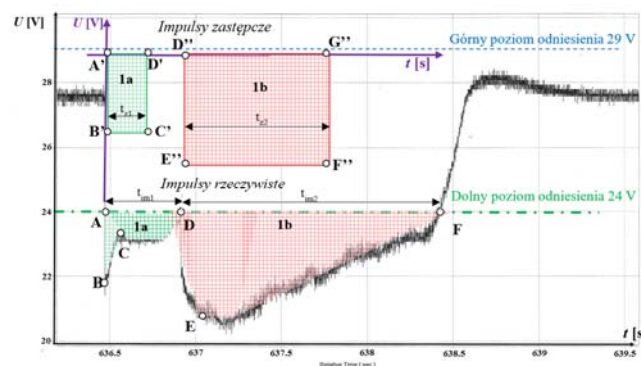
b) od 10% do 170%, a następnie od 170% do 10% mocy układu zasilania elektrycznego.

Przy skokowym zwiększeniu obciążenia następuje obniżenie napięcia gdzie powstaje impuls zanikowy. Przy skokowym zmniejszeniu obciążenia następuje zwiększenie napięcia gdzie powstaje impuls przepięciowy [3, 9] ja pokazano na rysunku 6 b).

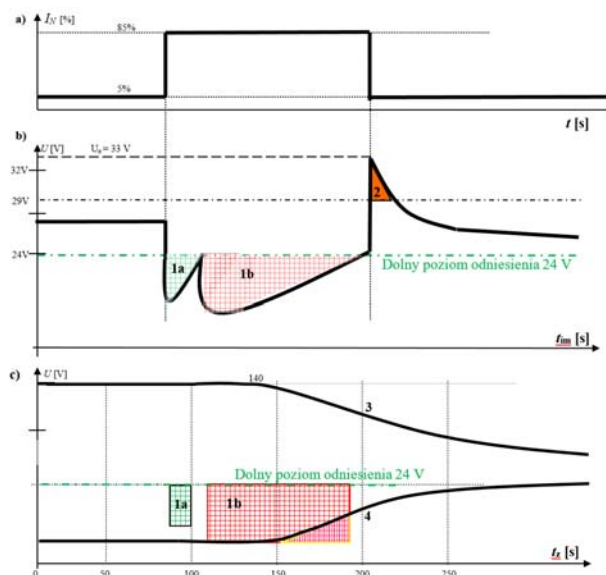
Na rysunku 6 przedstawiono przykład analizy stanu przejściowego napięcia wyjściowego prądnicą prądu stałego 28 V dla samolotu SU-22M4, gdzie uzyskano wynik negatywny: część prostokąta 1b przechodzi linię normatywną „4” [10].



Rys. 4. Przykład „pozytywnego” przebiegu napięcia w czasie wężła prądnicą prądu stałego przy skokowym zwiększeniu obciążenia (samolot Su-22M4)



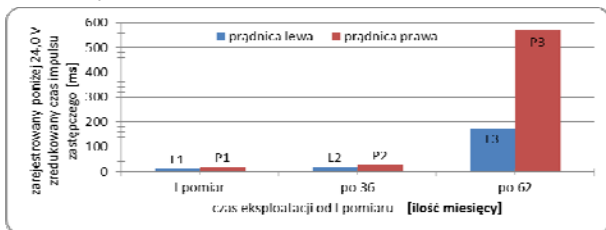
Rys. 5. Przykład „negatywnego” przebiegu napięcia w czasie wężła prądnicą prądu stałego przy skokowym zwiększeniu obciążenia (samolot Su-22M4)



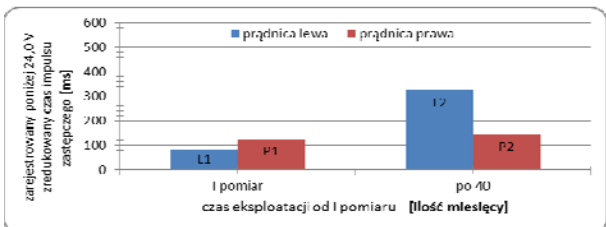
Rys. 6. Przykład analizy stanów przejściowych napięcia wyjściowego prądnicą prądu stałego 28 V dla samolotu S-22M4: a) impuls prądowy, b) przebieg napięcia wyjściowego, c) impulsy zastępcze zanikowe (2a, 2b, 2c) przepięciowe, (3, 4) krzywe normatywne.

Wpływ przemieszczenia linii magnetycznie obojętnej na czas trwania procesu przejściowego

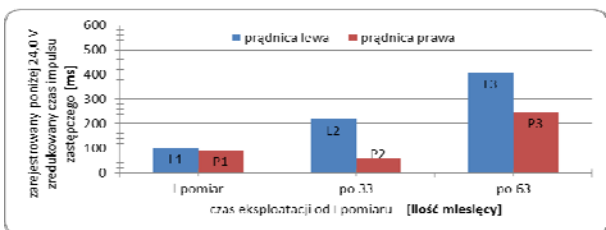
Decydujący wpływ na zmianę stanu technicznego urządzeń osprzętu lotniczego mają procesy starzenia i zużywania. Prowadzą one do zmian wartości parametrów diagnostycznych opisujących ich stan techniczny. W wyniku działania procesów starzenia narastają lub maleją parametry, które mogą być podstawą oceny niezawodnościowej urządzenia. Starzenie ma charakter nieodwracalny i wpływa na obniżenie niezawodności i trwałości urządzeń lotniczych. Parametrem, który jest bezpośrednio skorelowany z procesami starzenia zachodzącymi podczas eksploatacji węzłów zasilania prądu stałego samolotów Su-22 może być dynamika odpowiedzi węzła elektroenergetycznego prądnicy prądu stałego na skokowe przeciążenie albo skokowe zmniejszenie obciążenia. Dynamika ta jest reprezentowana przez wartości zredukowanego czasu impulsu zastępczego prądu stałego w odniesieniu do czasu ich eksploatacji. Na rysunku 7, 8, 9 przedstawiono wartości zredukowanego czasu impulsu zastępczego dla lewego i prawego węzła prądu stałego dla trzech badanych samolotów Su-22M4 w odniesieniu do ilości miesięcy ich eksploatacji. Samolot Su-22 ma zabudowane na pokładzie dwie prądnice prądu stałego (L, P) pracujące równolegle, aby uniknąć strat energetycznych. W czasie trwania procesu przejściowego dynamika obu węzłów (czas trwania impulsu zastępczego) powinna być również do siebie zbliżona.



Rys. 7. Wartości zredukowanego czasu impulsu zastępczego dla lewego i prawego węzła prądu stałego samolotu Su-22M4 nr 28309 w odniesieniu do ilości miesięcy ich eksploatacji



Rys. 8. Wartości zredukowanego czasu impulsu zastępczego dla lewego i prawego węzła prądu stałego samolotu Su-22M4 nr 37612 w odniesieniu do ilości miesięcy ich eksploatacji



Rys. 9. Wartości zredukowanego czasu impulsu zastępczego dla lewego i prawego węzła prądu stałego samolotu Su-22M4 nr 37920 w odniesieniu do ilości miesięcy ich eksploatacji

Parametry impulsów zastępczych węzłów prądu stałego samolotów Su-22 z roku na rok ich eksploatacji ulegają średnio - statystycznie zwiększeniu jak pokazano na rysunkach 7, 8 i 9. Zwiększeniu ulega również

zróznicowanie pomiędzy czasem trwania impulsu lewego i prawego węzła prądu stałego.

Po wykonaniu badań na kilkunastu samolotach Su-22, zauważono, że w kilku przypadkach wystąpiło znaczne przekroczenie dopuszczalnych progów normatywnych stanów przejściowych napięcia wyjściowego prądnicy prądu stałego. ITWL zapobiegł temu zjawisku poprzez wymianę agregatów węzła elektroenergetycznego tj. prądnicy prądu stałego na nowe. Po wstępnym przeglądzie procesu remontowego wykonanego, stwierdzono, że proces remontu agregatów węzła elektroenergetycznego przez zakłady remontowe nie gwarantuje niwelacji wszystkich procesów starzeniowych zachodzących w czasie eksploatacji samolotów Su-22. W związku z tym istnieje potencjalna możliwość wystąpienia niepoprawnej pracy tego węzła po przekazaniu samolotów po wykonanym remoncie do Użytkownika. Dlatego też istniejąca technologia remontu agregatów węzła elektroenergetycznego samolotów Su-22 powinna być rozszerzona o sprawdzenie i regulację położenia linii szczepek w celu ich umiejscowienia w strefach magnetycznie obojętnej [3]. ITWL wykonał regulację kilku kompletów prądnic prądu stałego GS-12T wraz z regulatorami napięcia RN-180M samolotów Su-22 [9, 10]. Aktualnie w wyregulowanych węzłach elektroenergetycznych samolotów Su-22 nie stwierdzono przekroczeń czasów normatywnych w czasie próby stanu przejściowego, a także nie stwierdzono przegrzewania izolacji przewodów elektrycznych przyłączanych do prądnicy prądu stałego na samolotach Su-22.

Autorzy: prof. dr hab. inż. Jerzy Lewitowicz, dr hab. inż. Andrzej Szelmanowski, dr hab. inż. Andrzej Gębura, dr inż. Andrzej Pazur, dr Edyta Franczuk, mgr inż. Tomasz Tokarski, Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych ul. Księcia Bolesława 6, 01-494 Warszawa, E-mail: andrzej.pazur@itwl.pl.

LITERATURA

- [1] Norma Obronna NO-15-A200:2016 Wojskowe statki powietrzne. Pokładowe układy zasilania elektrycznego. Podstawowe parametry, wymagania i badania, (2016)
- [2] MON-DWL: Samolot S-32MK – Opis techniczny i eksploatacja oddzielnych przyrządów i agregatów osprzętu, (1976)
- [3] Tokarski T., Gębura A., Analiza możliwości doprowadzenia układu zasilania elektrycznego prądu stałego samolotów Su-22 do samoregulacji napięcia zgodnie z wymaganiami Normy Obronnej NO-15-A200: 2007 z uwzględnieniem wyników badań wykonanych w czasie remontu weryfikacyjnego, ITWL, (2016)
- [4] Gębura A., Radoń T., Pulsacje napięcia wyjściowego jako źródło informacji diagnostycznych o komutatorowych prądnicach prądu stałego, ITWL, (2013)
- [5] Gębura A., Pulsacje napięcia wyjściowego prądnicy pokładowej prądu stałego źródłem informacji diagnostycznej o stanie układu napędowego. *Scientific Problems Of Machines Operation And Maintenance*, (2003), 187-201
- [6] Gębura A., Tokarski T., Wybrane problemy sterowania pokładowymi systemami prądu stałego i przemiennego, ITWL, (2015), 87-108
- [7] Makal J., Badanie obwodu magnetycznego strumienia stałego, (2009)
- [8] Gębura, A., Cechy diagnostyczne składowej pulsacji prądnicy prądu stałego, ITWL, (2003)
- [9] Tokarski T., Evaluation of direct current electric power systems of the aircraft based on characteristics of a transient state. *Diagnostyka* (2019), Vol. 20, No 1, 81-91
- [10] WZL-2 S.A., Proces technologiczny remontu (naprawy), Warunki Techniczne. Prądnica prądu stałego GS-12T 3s, (2013)