

Sławomir MICHALAK ORCID 0000-0002-6933-1604, slawomir.michalak@itwl.pl

Tomasz TOKARSKI ORCID 0000-0002-6036-010X,

tomasz.tokarski@itwl.pl – corresponding author

Air Force Institute of Technology (Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych)

WPŁYW CZASU EKSPLOATACJI SYSTEMU ELEKTROENERGETYCZNEGO STATKU POWIETRZNEGO NA JAKOŚĆ ENERGII W STANACH NIEUSTALONYCH

The effect of the operation time of the aircraft power system on power quality in transient states

Streszczenie: *W pracy omówiono znaczenie parametrów energii elektrycznej w stanach nieustalonych dla oceny zdolności sieci elektroenergetycznej statku powietrznego do samoregulacji. Wykazano, iż na jakość energii elektrycznej systemu elektroenergetycznego statku powietrznego wpływa czas jego eksploatacji. Zmiany starzeniowe wynikające z długotrwałej eksploatacji systemu elektroenergetycznego powodują pogorszenie parametrów energii elektrycznej, a to wpływa bezpośrednio na zdarność do lotów oraz bezpieczeństwo latania. Zachowanie normatywnych parametrów energii w stanach nieustalonych jest bardzo istotne dla zapewnienia prawidłowej eksploatacji statku powietrznego. W artykule opisano metodę pomiarów jakości energii elektrycznej w stanach nieustalonych, a na przykładzie systemu elektroenergetycznego prądu stałego samolotu Su-22 przedstawiono istotę diagnostyki jego sieci w stanach nieustalonych. Zaprezentowano również przykładowe wyniki badań, przeprowadzonych przez autorów, dotyczących zmian parametrów energii elektrycznej w stanach nieustalonych samolotu Su-22, uzyskane w czasie jego wieloletniej eksploatacji.*

Słowa kluczowe: diagnostyka, starzenie, system elektroenergetyczny SP, jakość energii, stan nieustalony, samoregulacja, zdarność do lotów, bezpieczeństwo latania.

Abstract: *The paper presents the importance of electricity parameters in transient states for assessing the ability of an aircraft's power grid to self-regulate. It has been shown that the quality of electrical energy of an aircraft's power system is influenced by its operating time. Aging changes resulting from long-term operation of the power system cause*

deterioration of electrical energy parameters, which directly affects airworthiness and flying safety. Maintaining standard energy parameters in transient states is very important to ensure proper operation of the aircraft. The article describes the method of measuring the quality of electricity in transient states, and using the example of the DC power system of the Su 22 aircraft, the essence of its network diagnostics in transient states is presented. Also presented are sample results of research conducted by the authors regarding changes in electrical energy parameters in transient states of the Su 22 aircraft, obtained during its many years of operation.

Keywords: diagnostics, aging, SP power system, power quality, transient state, self-regulation, airworthiness, flying safety.

Received: January 24, 2024 / Revised: February 22, 2024 / Accepted: March 1, 2024 / Published: March 28, 2024

1. Wprowadzenie

Priorytetowe znaczenie w bezpiecznej eksploatacji statku powietrznego ma wytwarzanie na jego pokładzie energii elektrycznej. Zmieniające się kryteria w zakresie zabudowywanych systemów na statkach powietrznych, w tym systemów elektroenergetycznych powodują, iż obecnie zarówno cywilne, jak i wojskowe lotnictwo charakteryzuje się dużym zapotrzebowaniem na energię elektryczną. Jednocześnie coraz większą uwagę w czasie eksploatacji statków powietrznych zwraca się na aspekty związane z szeroko rozumianym bezpieczeństwem lotu, które szczególną rolę odgrywa w przypadku transportu lotniczego [1–5]. Systemy elektroenergetyczne statków powietrznych należą do grupy określanej mianem *isolated power systems* [6]. System te stanowią samodzielną sieć komponentów, których zadaniem jest wytwarzanie, przesyłanie, dystrybucja oraz wykorzystywanie i przechowywanie energii elektrycznej. Generowanie, regulowanie i dystrybucja mocy do poszczególnych systemów statku powietrznego jest główną funkcją tego systemu [7]. Niezawodność zasilanych systemów, jak i podsystemów elektrycznych statku powietrznego w znacznej części związana jest walorami eksploatacyjnymi stosowanego systemu elektroenergetycznego. We współczesnym lotnictwie obserwuje się tendencje wzrostu tej zależności [8–12]. Obecnie w systemach elektroenergetycznych statków powietrznych wykorzystywany jest zarówno prąd przemienny, jak i stały. W przypadku wojskowych statków powietrznych prawidłowe działanie tych systemów w każdych warunkach wymaga zasilania energią elektryczną o parametrach i jakości określonych w normach, np.: NO-15-A-200 [18] lub MIL-STD-704 [13]. Do podlegających kontroli parametrów i cech jakości energii elektrycznej należą m.in.: wartość napięcia, wartość pulsacji prądu stałego, częstotliwość napięcia prądu przemiennego, asymetria napięcia, zawartość harmonicznych, zaniki napięcia, impulsy przepięciowe. Niezbędnym warunkiem prawidłowej pracy wszystkich systemów statku powietrznego zasilanych

energią elektryczną jest zapewnienie normatywnej (poprawnej) wartości tych parametrów. Szczególnie jest to istotne w eksploatacji współczesnych statków powietrznych, na których są instalowane coraz bardziej rozwinięte technologicznie układy i systemy, wymagające coraz wyższych standardów zasilającej je energii elektrycznej. Zwłaszcza zachowanie normatywnych parametrów jakości energii w stanach nieustalonych jest bardzo istotne do zapewnienia prawidłowej eksploatacji nowoczesnych systemów statku powietrznego. Wynika to z konieczności zwiększenia w lotnictwie bezpieczeństwa użytkowania stosowanych systemów oraz dążenia do poprawy charakterystyk technicznych statków powietrznych. Ponadto system elektroenergetyczny powinien być traktowany ze szczególną uwagą, ponieważ jest on zainstalowany na obiekcie ruchomym – statku powietrznym i ma decydujący wpływ na jego funkcjonowanie i bezpieczeństwo lotu [14, 15].

2. Znaczenie parametrów stanu nieustalonego dla oceny zdolności sieci elektroenergetycznej do samoregulacji

Prawidłowe działanie urządzeń i systemów zamontowanych na pokładzie statku powietrznego zależy od jakości energii elektrycznej wytwarzanej przez jej prądnice (tj. pierwotne źródła energii elektrycznej prądu stałego lub przemiennego) oraz przekazywania tej energii przez sieci przesyłowo-rozdzielcze do zasilania poszczególnych systemów pokładowych. Nieprawidłowe funkcjonowanie systemu elektroenergetycznego wpływa negatywnie na działanie zasilanych przez niego systemów statku powietrznego i stanowi bezpośrednie zagrożenie bezpieczeństwa lotu. Najbardziej istotnymi zaburzeniami w systemie zasilania sieci elektroenergetycznej statku powietrznego są szybkie zmiany napięcia, jego zaniki i pozanormatywne wzrosty oraz przepięcia i impulsy szpilkowe. Zatem ocena parametrów energii elektrycznej w tym zakresie jest niezmiernie ważna do zapewnienia prawidłowej eksploatacji statku powietrznego. Szczególne znaczenie nabiera powyższe stwierdzenie w odniesieniu do starzejącej się techniki lotniczej i procesów starzeniowych zachodzących w eksploatowanych przez wiele lat instalacjach elektroenergetycznych statków powietrznych. Starzenie ma znaczący wpływ na pogorszenie niezawodności i trwałości urządzeń lotniczych, ponieważ zmniejsza niezawodność pokładowych źródeł i systemów energii elektrycznej oraz stwarza potencjalne zagrożenie dla bezpieczeństwa lotów statków powietrznych [4, 5, 9]. Tym samym szeroko rozumiany system elektroenergetyczny statku powietrznego wpływa swą kondycją, często obniżoną, na skutek procesów starzeniowych, na obniżenie trwałości wszystkich innych systemów [16, 17]. O użyteczności energii elektrycznej dostarczanej do urządzeń pokładowych decydują określone w normach [13, 18] wymagania jakościowe. Zapewnienie wymaganych parametrów jakości energii elektrycznej jest niezbędnym

warunkiem poprawnej pracy zasilanych systemów statku powietrznego. Brak spełnienia prawidłowych wartości parametrów wytworzonej energii elektrycznej przez źródła pokładowe może powodować zakłócenia pracy systemów pokładowych, a nawet ich wyłączenia lub w skrajnych przypadkach uszkodzenia. Wzajemne oddziaływanie systemu elektroenergetycznego i odbiorników energii może powodować zakłócenia jakości energii systemu zasilania statku powietrznego. Oprócz zakłóceń stałych, związanych z obciążeniem wprowadzanym przez prawidłowo działające systemy i odbiorniki energii elektrycznej, znaczące (a często bardziej niebezpieczne i szkodliwe dla systemu zasilania) są zakłócenia losowe. Zakłócenia te są związane z awariami elementów systemu dystrybucji energii elektrycznej lub lokalnych instalacji elektrycznych, jak również odbiorników dużej mocy. Awarie te mogą mieć skutki nie tylko w części instalacji elektrycznej systemu elektroenergetycznego statku powietrznego bezpośrednio objętej awarią, ale mogą progresywnie rozszerzać się na inne podzespoły i systemy zasilane tą energią. Dla urządzeń i systemów statku powietrznego szczególnie istotna jest skokowa zmiana pobieranej mocy, która powoduje stany nieustalone w jego sieci elektroenergetycznej. Przykładem negatywnego wpływu stanów nieustalonych systemu elektroenergetycznego statku powietrznego na jego systemy pokładowe jest np. samoczynne zadziałanie systemu ppoż. (SSP-FK) na śmigłowcu Mi-8, spowodowane zakłóceniami elektrycznymi w postaci impulsów napięciowych [19, 20]. Fałszywa sygnalizacja pożaru przez system ppoż. jest zagadnieniem ważnym dla bezpiecznej eksploatacji samolotów i śmigłowców wojskowych [21], ponieważ jest to system prewencyjny (ostrzegający pilota o wystąpieniu pożaru w poszczególnych przedziałach statku powietrznego) i ratowniczy (w zakresie gaszenia pożaru) w każdej fazie lotu. Badania wykazały [19], że najbardziej prawdopodobną przyczyną samoczynnego zadziałania (bez wystąpienia pożaru) wspomnianego systemu było błędne wypracowanie sygnału pożaru przez jego blok wykonawczy (SSP-FK-BI). Przyczyną fałszywego uruchomienia systemu ppoż. (samoczynnego zadziałania tego bloku) mogło być wystąpienie w sieci elektroenergetycznej śmigłowca chwilowych zakłóceń (impulsów zanikowych i przepięciowych). Powyższy przykład potwierdza, że od prawidłowego działania sieci elektroenergetycznej statku powietrznego zależy poprawność funkcjonowania pozostałych jego systemów pokładowych, a badanie sieci elektroenergetycznych z uwagi na konieczność zapobiegania nieprawidłowościom w jego działaniu jest istotnym elementem w procesie eksploatacji statków powietrznych. Specyfiką techniki lotniczej jest odpowiednie kształtowanie konstrukcyjne i technologiczne wykorzystywanych w lotnictwie części, zespołów oraz systemów i urządzeń. Racjonalne ich użytkowanie oraz obsługiwanie i przechowywanie w zasadniczy sposób spowalnia procesy starzenia i poprawia wskaźniki ekonomiczne eksploatacji. Pomimo zapewnienia już na etapie konstruowania i produkcji najwyższych standardów, wymagany poziom niezawodności bezpieczeństwa współczesnego statku powietrznego nie może zostać

osiągnięty bez realizacji prac obsługowych. Dlatego w celu wyznaczenia optymalnego modelu eksploatacji konieczne jest prawidłowe rozpoznanie procesów i zjawisk charakterystycznych dla eksploatacji techniki lotniczej, ich zbadanie eksperymentalne zarówno w laboratorium, jak i na pokładzie statku powietrznego oraz opisanie z wykorzystaniem odpowiedniego aparatu matematycznego, a następnie wypracowanie środków zaradczych [1, 5, 21–23].

W lotnictwie wojskowym RP, m.in. na statkach powietrznych: Su-22, MiG-29, PZL-130TC II Orlik, W-3WA, SW-4, M-28B/PT Skytrack, CASA-C295M, Mi-8, Mi-2, jako podstawowe źródło energii elektrycznej ich systemów elektroenergetycznych nadal wykorzystuje się komutatorowe prądnice prądu stałego. Ponadto silniki komutatorowe prądu stałego wykorzystywane są np. do rozruchu bezpośredniego głównego silnika turbinowego, jak np. ST-107 w W-3WA Sokół lub do rozruchów turbostarterów, np.:

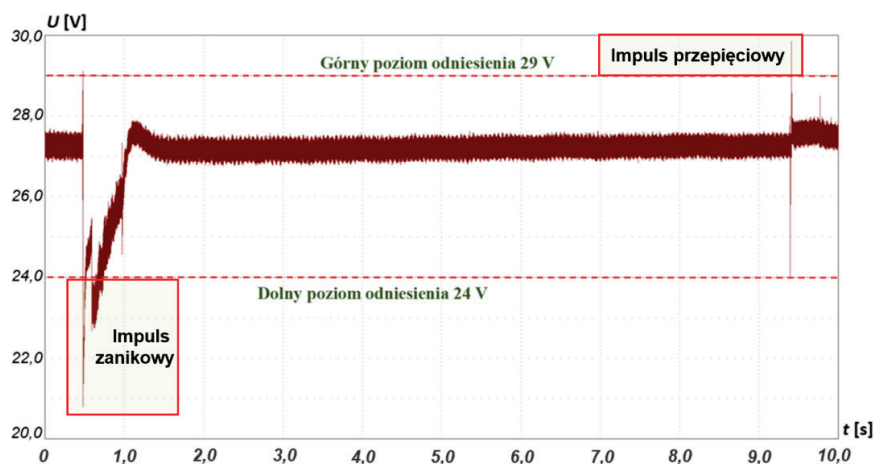
- NSN-2925-01-221-3247 w turbostarterze samolotu Herkules;
- STG-3 w turbostarterach AI-9 i AI-9W śmigłowców: Mi-14, Mi-17, Mi-24;
- LUN 2251.01 w turbostarterze SAFIR5K/G78 oraz SAFIR5K/M1 śmigłowca Mi-17.

Zaletami sieci wykorzystującej komutatorowe prądnice prądu stałego są m.in.: łatwa współpraca z pokładową baterią akumulatorową oraz możliwość współpracy buforowej, czyli pobieranie energii z baterii akumulatorowej podczas przeciążenia prądnicy. Prądnice prądu stałego umożliwiają również nieskomplikowaną współpracę równoległą, ponieważ nie wymagają synchronizowania częstotliwości ani faz [24]. Ponadto komutatorowa prądnica prądu stałego jest maszyną odwracalną, tzn. może pracować jako prądnica – a za chwilę może być użyta jako rozrusznik. Do zalet tego układu należą również: prosty układ regulacji napięcia, który kontroluje tylko amplitudę napięcia wyjściowego prądnicy [25, 26, 27, 28, 29].

Jak wspomniano wcześniej, prądnice prądu stałego wykorzystywane są na samolocie Su-22, gdzie w jego systemie elektroenergetycznym stanowią główne źródło zasilania. Autorzy zaobserwowali [14, 30], iż w czasie długotrwałej eksploatacji procesy starzeniowe pogarszają dynamikę stanów nieustalonych systemu zasilania prądu stałego samolotu Su-22 oraz zmniejszają zdolność do prawidłowej samoregulacji. O istocie zagadnienia mogą świadczyć stwierdzone w czasie eksploatacji uszkodzenia prądnicy prądu stałego GS-12T 3s stanowiącej główne źródło zasilania sieci elektroenergetycznej samolotu Su-22 [31]: uszkodzenia w prądnicy komutatora i twornika, uszkodzenia szczotek oraz przegrzanie ich linek, a w instalacji samolotu natomiast przegrzanie obwodów wzbudzenia prądnicy lub ich uszkodzenia oraz nieprawidłowe działanie sieci w stanach nieustalonych, które negatywnie wpływają na zasilane systemy pokładowe SP [14].

3. Istota diagnostyki systemu elektroenergetycznego prądu stałego w stanach nieustalonych

Diagnostyka systemu elektroenergetycznego statku powietrznego realizowana jest poprzez systematyczne badania jakości energii elektrycznej w czasie eksploatacji, co umożliwia ocenę stanu technicznego tego systemu oraz określenie zdolności do lotu. W celu oceny jakości energii elektrycznej systemu elektroenergetycznego statku powietrznego przeprowadza się m.in. badania tego systemu w stanach nieustalonych. Stan nieustalony (zwany także przejściowym) występuje przy zmianie obciążenia prądowego systemu elektroenergetycznego statku powietrznego, to znaczy przy skokowym włączeniu i wyłączeniu obciążenia sieci. Stan nieustalony jest to stan, w którym występują zmiany sygnału wyjściowego na wyjściu układu zawierającego w swojej strukturze źródło energii [18, 32]. Stan trwa od momentu zmiany obciążenia energetycznego źródła energii do momentu ustalenia się wartości sygnału na wyjściu w określonych wartościach granicznych. Badania stanów nieustalonych przeprowadza się w celu określenia zdolności układu zasilania elektrycznego statku powietrznego do samoregulacji napięcia [18].

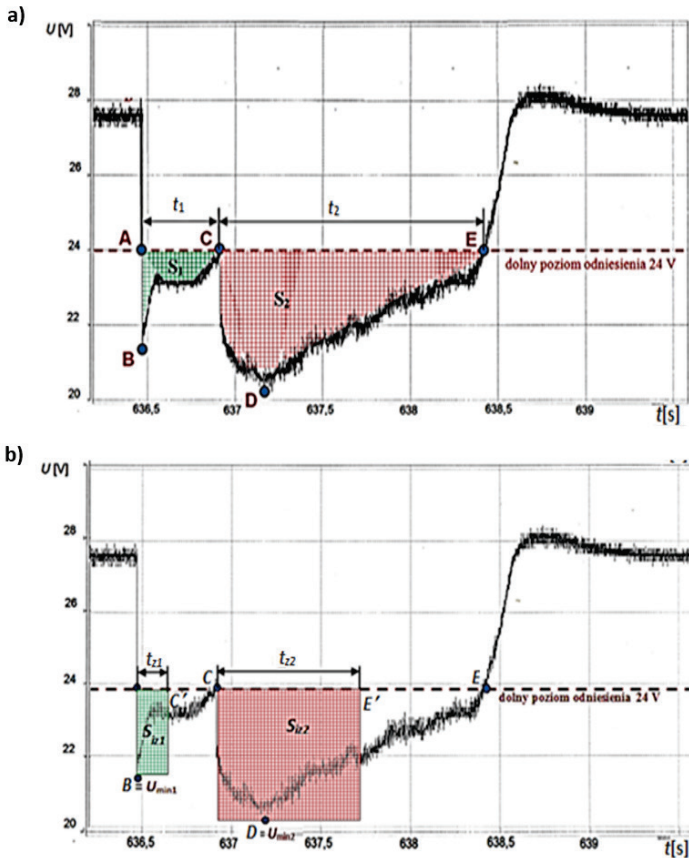


Rys. 1. Przebieg napięcia w czasie z badania stanu nieustalonego sieci elektroenergetycznej prądu stałego 28 V samolotu Su-22 – przykład „pozytywny” z zaznaczonymi wartościami granicznymi

Przykładem takiego badania jest zmiana obciążenia prądowego układu zasilania elektrycznego sieci elektroenergetycznej prądu stałego z samolotu Su-22 (rys. 1). Badania te realizowane są przez włączanie i wyłączenie zabudowanych na jego pokładzie etatowych odbiorników energii elektrycznej dużej mocy (przetwornic PTO-1000/1500). W czasie badania stanów nieustalonych zmiana sygnału na wyjściu może przebiegać w postaci

wykładniczej lub oscylacyjnej, jak to ma miejsce w przypadku przedstawionym na rys. 1. Przy skokowym zwiększeniu obciążenia następuje obniżenie napięcia poniżej 24 V i powstaje impuls zanikowy, a przy skokowym zmniejszeniu obciążenia następuje zwiększenie napięcia powyżej 29 V i powstaje impuls przepięciowy.

Ogólnie analiza powstałych impulsów zanikowych i przepięciowych polega na określeniu wartości iloczynu pozanormalywnego czasu i napięcia – całki z napięcia po czasie. Na rys. 2 przedstawiono przykład analizy stanów nieustalonych przebiegu napięcia w czasie po skokowym obciążeniu sieci elektroenergetycznej prądu stałego 28 V.



Rys. 2. Przykład analizy „negatywnego” przebiegu napięcia w czasie z badania stanu nieustalonego układu zasilania prądu stałego 28 V samolotu Su-22 [14, 29]: a) A-B-C i C-D-E – krzywe przebiegu napięcia w czasie – stan przejściowy (impulsy zanikowe); b) pola powierzchni impulsu zastępczego zanikowego napięcia (A'-B' i C'-D' wysokość U_{min} oraz odpowiednio A'-C' i C'-E' szerokość t_z), S_1 , S_2 – pole powierzchni pod dolnym poziomem odniesienia 24 V przebiegu rzeczywistego, S_{1z1} , S_{1z2} , – równoważne impulsy zastępcze przebiegu rzeczywistego

Napięcia stanu nieustalonego zgodnie z normą [18] przekształca się na ich równoważne impulsy zastępcze, czyli prostokątne impulsy zastępcze napięcia stałego, które odzwierciedlają rzeczywiste impulsy napięciowe (rys. 2a, szczegóły: S_1 , S_2 – impulsy zanikowe). Impuls zastępczy S_{iz} ma to samo pole powierzchni i wartość napięcia minimalnego U_{min} co impuls rzeczywisty S_I . Impuls zastępczy (rys. 2b, szczegóły: S_{iz1} , S_{iz2}) ma kształt prostokąta i krótszy czas (czas zredukowany t_z) niż impuls rzeczywisty.

Dla przedstawionego na rys. 2a stanu nieustalonego impulsy zastępcze (pola powierzchni S_1 , S_2 pod dolnym poziomem odniesienia 24 V) należy obliczyć zgodnie z wzorami (1) i (2) [33].

$$S_1 = \int_0^{\Delta t_{AC}} [24 - U(t)] dt \quad (1)$$

$$S_2 = \int_0^{\Delta t_{CE}} [24 - U(t)] dt \quad (2)$$

Czas zredukowany t_z impulsu zastępczego należy obliczyć ze wzoru (3).

$$t_z = \frac{S}{24 - U_{min}} \quad (3)$$

Parametr wyznaczany w stanie nieustalonym to wartość iloczynu pozanormalywnego czasu i napięcia, który zamienia się na tzw. równoważny impuls zastępczy S_{iz} zgodnie z wzorami (4) i (5).

$$S_{iz1} = 24 - U_{min1} \cdot t_{z1} \quad (4)$$

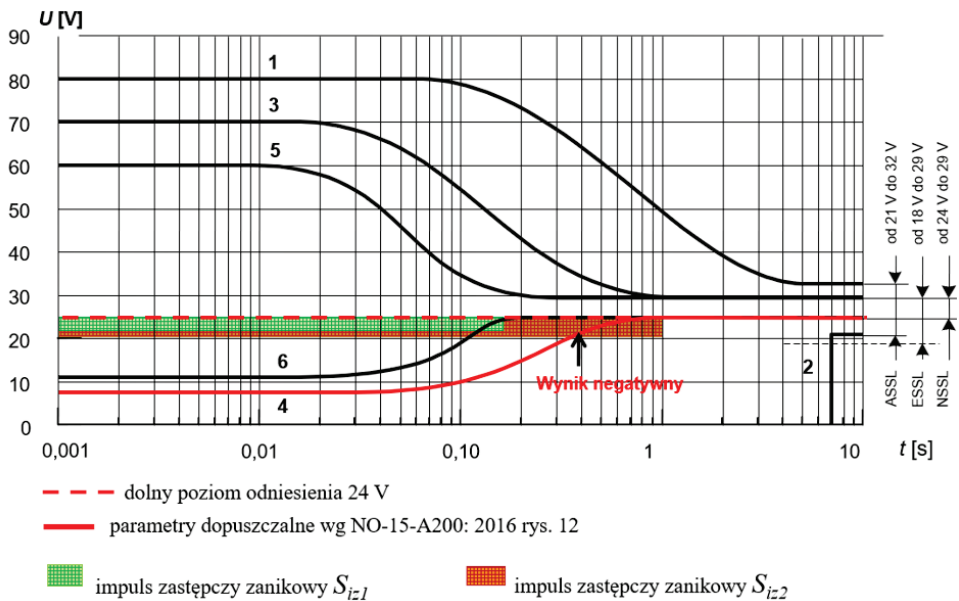
$$S_{iz2} = 24 - U_{min2} \cdot t_{z2} \quad (5)$$

Tak wyznaczone impulsy jako równoważne impulsy zastępcze S_{iz} (rys. 2b – prostokąt o bokach: wysokość U_{min} i szerokość t_z), przyrównywane są do normalywnych charakterystyk stanu nieustalonego, a ich wartości powinny mieścić się w granicach określonych w normie [18].

Przykładową analizę pomiarów stanów nieustalonego (impulsów zanikowych) uzyskanych w wyniku badania sieci elektroenergetycznej prądu stałego 28 V na samolocie Su-22 przedstawiono na rys. 3. W przypadku prezentowanej sieci wynik pomiaru uznaje się za pozytywny, jeżeli impulsy zastępcze zanikowe nie przetną w żadnym punkcie dolnej obwiedni normalywniej (krzywa nr 4 na rys. 3), zaś impulsy przepięciowe górnej obwiedni normalywniej (krzywa nr 3 na rys. 3).

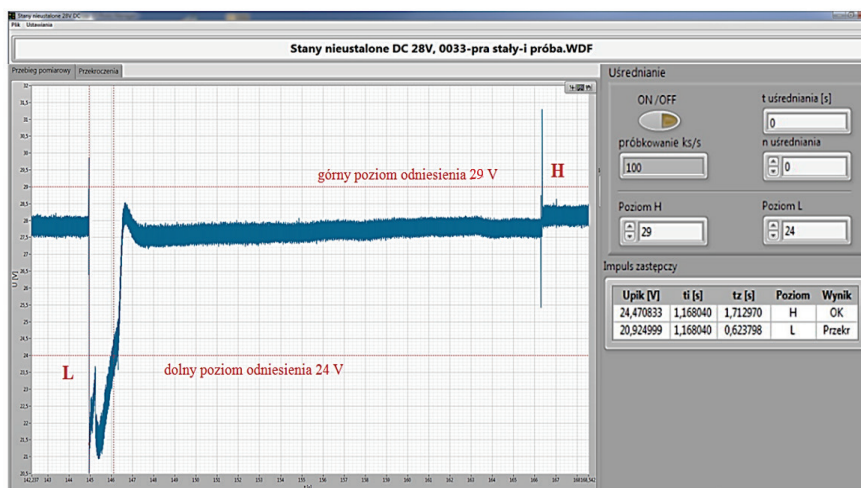
Z analizy wynika, iż przedstawiony na rys. 2a przebieg napięcia w stanie nieustalonym z impulsami zanikowymi jest przykładem nieprawidłowo działającej sieci elektroenergetycznej prądu stałego na samolocie Su-22. Jeden z impulsów zastępczych przeciął

krzywą normatywną (rys. 3), w związku z tym wynik badania jest negatywny. Najczęściej przyczynia się do tego niesprawną prądnica, jej układ regulacji napięcia lub zwiększona rezystancja obwodu wzbudzenia prądnicy.



Rys. 3. Przykład analizy „negatywnego” przebiegu napięcia w czasie z badania stanu nieustalonego układu zasilania prądu stałego 28 V samolotu Su-22 (z Rys. 2) na tle normatywnych [85] przedziałów zmian napięcia prądu stałego w układach zasilania elektrycznego zasilanych z prądnicy prądu stałego

Analizowane przebiegi napięcia stanu nieustalonego badanej sieci elektroenergetycznej mogą przybierać skomplikowane kształty, co jest trudne do jego oceny jakościowej. Z powyższych względów w celu zautomatyzowania przedstawionej analizy w ITWL opracowano oprogramowanie Abakus WDF. Program opracowano w środowisku graficznym NI LabVIEW (National Instruments LabVIEW) [15]. Powyższy program służy do analizy stanów nieustalonych przebiegów napięciowych zarejestrowanych za pomocą rejestratora Yokogawa DL850 lub DL750. Widok zakładki „Przebieg pomiarowy” programu Abakus WDF z przykładową analizą stanów nieustalonych przebiegu napięcia w czasie prądu stałego 28 V badanej sieci elektroenergetycznej samolotu Su-22 pokazano na rys. 4. Z analizy powyższym programem wynika, że zarejestrowany impuls zanikowy przekroczył normatywne wartości dopuszczalne, natomiast impuls przepięciowy spełnia wymagania normy [18].



Rys. 4. Widok zakładki „Przebieg pomiarowy” programu Abakus WDF opracowanego w środowisku graficznym NI LabVIEW w ITWL: H – impuls napięciowy powyżej górnego poziomu odniesienia 29 V – OK (wynik pozytywny), L – impuls zanikowy poniżej dolnego poziomu odniesienia 24 V – przekroczenie (wynik negatywny) [15]

4. Wpływ czasu eksploatacji na kształtowanie parametrów stanów niustalonych pokładowego systemu elektroenergetycznego samolotu Su-22

Stan techniczny systemu elektroenergetycznego statku powietrznego wynika z jego przeszłości, a znajomość bieżącego stanu jest potrzebna do ustalenia jego zachowania się w przyszłości. Decydujący wpływ na zmianę stanu technicznego systemu elektroenergetycznego statku powietrznego mają procesy starzenia i zużywania jego urządzeń i elementów. Prowadzą one do zmian wartości parametrów diagnostycznych opisujących ich stan techniczny. Starzenie ma charakter nieodwracalny i wpływa na obniżenie niezawodności i trwałości poszczególnych urządzeń i elementów systemu. Istotnym zagadnieniem jest rozpoznanie fizyki tych procesów umożliwiających ujęcie analityczne ich przebiegu. Procesy starzenia i zużywania opisujemy w takim przypadku odpowiednio dobranymi modelami matematycznymi. Jednak procesy starzenia i zużywania występujące podczas eksploatacji urządzeń awioniki są procesami złożonymi i trudnymi do deterministycznego opisanie. Prognozowanie niezawodności i trwałości urządzeń lotniczych wymaga rozpoznania wielu procesów destrukcyjnych pogarszających ich stan techniczny [5, 34]. Przy wyznaczaniu modelu rozkładu niezawodności i trwałości urządzeń osprzętu lotniczego na podstawie analizy zachodzących podczas eksploatacji procesów starzenia i zużywania niezwykle istotne

znaczenie ma możliwość wnioskowania przy niepełnych danych charakteryzujących poszczególne procesy. Nawet mając pełne dane, otrzymane rezultaty są obciążone dość dużym błędem. Przy niepełnych danych wnioskowanie o rozkładzie niezawodności i trwałości urządzeń lotniczych na podstawie analizy procesów starzenia i zużywania jest niezwykle trudne. Niezbędne staje się zastosowanie metod pomiarowych do określania modeli niezawodności i trwałości urządzeń lotniczych. Wykorzystują one jako podstawowe źródło informacji prognozującej wyniki pomiarów wartości liczbowych niektórych parametrów lub zmian tych wielkości. Niezawodność i trwałość urządzeń osprzętu lotniczego można prognozować z wykorzystaniem metod pomiarowych, jeśli znany jest parametr prognozujący oraz istnieje możliwość pomiaru jego wartości w funkcji czasu.

Przedstawione w opracowaniu [30] badania systemu elektroenergetycznego samolotu Su-22 pozwoliły na określenie takiego parametru diagnostycznego. Parametrem bezpośrednio związanym z procesami starzenia zachodzącymi podczas eksploatacji sieci elektroenergetycznej prądu stałego samolotów Su-22, których podstawowym źródłem zasilania są prądnice prądu stałego GS-12T 3s, może być dynamika odpowiedzi jej sieci na skokowe obciążenie albo skokowe zmniejszenie obciążenia. Dynamika ta jest reprezentowana przez wartości zredukowanego czasu impulsu zastępczego prądu stałego. Parametrem, który jest bezpośrednio skorelowany z procesami starzenia zachodzącymi podczas eksploatacji sieci elektroenergetycznej prądu stałego samolotów Su-22, jest zarejestrowana poniżej napięcia 24 V wartość zredukowanego czasu impulsu zastępczego zanikowego. Wartość ta w odniesieniu do czasu eksploatacji systemu [18, 32] jednoznacznie identyfikuje okres przydatności do użycia węzłów zasilania prądu stałego sieci elektroenergetycznej badanego statku powietrznego.

Realizowane od 2007 r. przez ITWL badania systemu elektroenergetycznego prądu stałego w stanach nieustalonych samolotu Su-22 dostarczyły informacji o jakości energii elektrycznej sieci prądu stałego w długim przedziale czasowym w warunkach rzeczywistej eksploatacji na lotniskach.

Przykładowe wyniki pomiarów stanów przejściowych sieci prądu stałego samolotu Su-22 w kolejnych miesiącach eksploatacji przedstawiono w tabeli 1. Wyniki te potwierdzają, że wartości zredukowanego czasu impulsu zastępczego dla poszczególnych sieci elektroenergetycznych prądu stałego zwiększają się wraz z czasem eksploatacji.

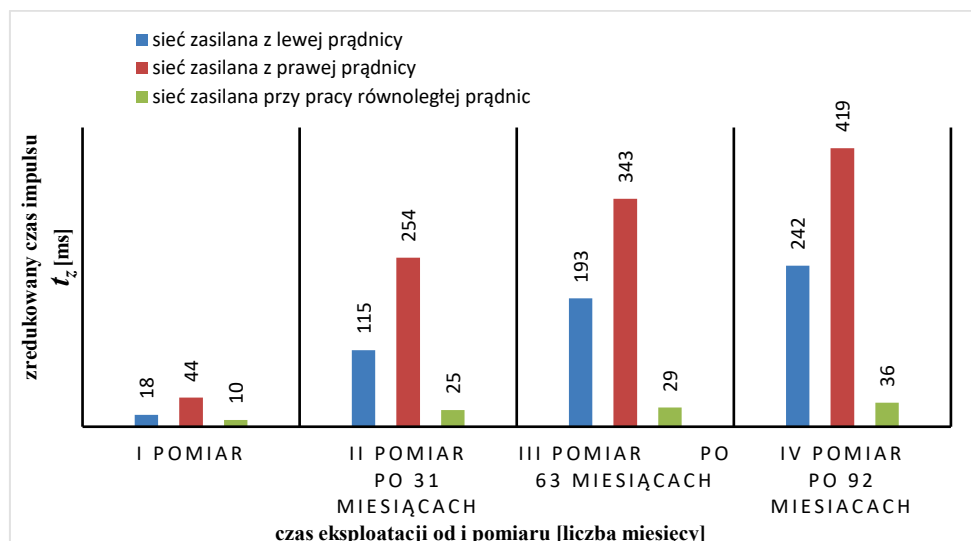
Zobrazowanie graficzne zmian wartości zredukowanego czasu impulsu zastępczego dla sieci elektroenergetycznej prądu stałego samolotu Su-22 w odniesieniu do liczby miesięcy eksploatacji przedstawiono na rys. 5. Można tu zaobserwować, że w prezentowanym okresie 92 miesięcy eksploatacji SP od I do IV próby nastąpił wzrost wartości zredukowanego czasu impulsu zastępczego zarówno dla sieci prądu stałego zasilanej z lewej i prawej prądnicy, jak również podczas pracy równoległej tych prądnic na wspólną sieć systemu elektroenergetycznego. W przypadku sieci prądu stałego zasilanej z lewej prądnicy wartość

zredukowanego czasu impulsu zastępczego w IV próbie była zbliżona do dopuszczalnej wartości granicznej określonej w normie [18].

Tabela 1

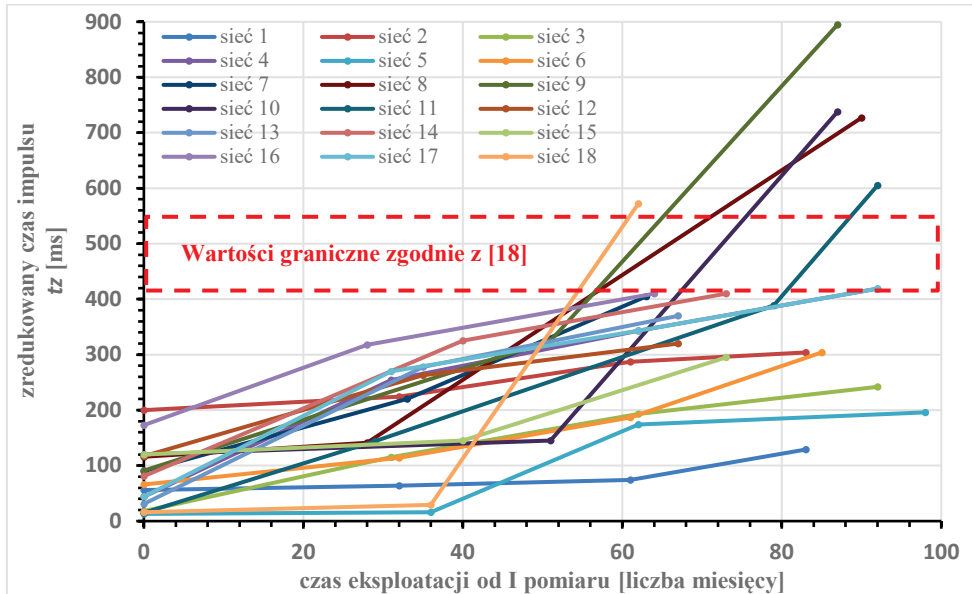
Pomiar stanów przejściowych sieci prądu stałego samolotu Su-22 w kolejnych latach eksploatacji

Badana sieć elektroenergetyczna SP	Kolejne miesiące eksploatacji							
	I próba stan wyjściowy sieci		II próba stan sieci po 31 miesiącach eksploatacji		III próba stan sieci po 63 miesiącach eksploatacji		IV próba stan sieci po 92 miesiącach eksploatacji	
	Wartość impulsu zastępczego		Wartość impulsu zastępczego		Wartość impulsu zastępczego		Wartość impulsu zastępczego	
	t_z	U_{min}	t_z	U_{min}	t_z	U_{min}	t_z	U_{min}
	[ms]	[V]	[ms]	[V]	[ms]	[V]	[ms]	[V]
Sieć Nr 1	10	21,6	39	18,89	29	19,89	40	21,54
	8	23,3	76	21,74	164	22,29	202	22,71
Sieć Nr 2	24	21,6	62	19,23	28	19,73	114	21,75
	20	23,1	192	20,45	315	21,98	305	21,48
Praca równoległa sieci Nr 1 + Nr 2	9	21,6	15	20,41	11	20,14	14	21,17
	1	23,8	10	22,85	18	23,49	20	23,27



Rys. 5. Wartości zredukowanego czasu impulsu zastępczego dla sieci prądu stałego samolotu Su-22 zasilanej z lewej i prawej prądnic oraz przy pracy równoległej prądnic w odniesieniu do liczby miesięcy ich eksploatacji

Na rys. 6 przedstawiono kolejne przykłady wyników badań jakości energii elektrycznej w stanach przejściowych wykonanych przez autorów [14, 30] podczas długoletniej eksploatacji sieci elektroenergetycznej prądu stałego samolotu Su-22 w warunkach rzeczywistych.



Rys. 6. Przykłady zmian zredukowanego czasu impulsu zastępczego w sieci elektroenergetycznej prądu stałego samolotu Su-22 w odniesieniu do czasu ich eksploatacji

Na przedstawionych przykładach charakterystyk dla badanych sieci elektroenergetycznych prądu stałego samolotu Su-22 wraz czasem eksploatacji można zaobserwować różnorodną intensywność wzrostu wartości zredukowanego czasu impulsu zastępczego. Różnorodność ta wynika z dużego zróżnicowania właściwości poszczególnych podzespołów stanowiących wyposażenie badanych sieci elektroenergetycznych. Przyczyną z kolei jest bieżący stan techniczny wynikający m.in. z ich czasu eksploatacji. Tym niemniej obserwowane zmiany wartości zredukowanego czasu impulsu zastępczego, których wyniki bezpośrednio można odnieść do wymagań normatywnych [18], świadczą o skuteczności i przydatności zastosowanej metody w procesie diagnostycznym statków powietrznych. Z powyższych względów, aby prognozowanie niezawodności i trwałości diagnozowanych sieci elektroenergetycznych, w oparciu o wyniki uzyskane metodą pomiarów jakości energii elektrycznej w stanach nieustalonych, skutecznie polepszało bezpieczeństwo latania, należy badania te wykonywać systematycznie. Przedstawione charakterystyki, dla których nastąpiło przekroczenie wartości granicznych, wskazują, że w przypadku długotrwałej eksploatacji w celu zapewnienia zdatności do lotu należy zwiększyć częstotliwość wykonywanych badań.

5. Wnioski

Parametry impulsów zastępczych węzłów prądu stałego samolotów Su-22 z roku na rok ulegają średnio statystycznie pogorszeniu. Obrazują to stwierdzone przez autorów wyniki pomiarów stanów przejściowych w trakcie realizacji badań związanych z przedłużeniem resursów samolotów w kolejnych latach ich eksploatacji.

Przedstawione przykłady świadczą o znaczeniu przedstawianego zagadnienia dla bezpieczeństwa lotów oraz o tym, że badanie stanów przejściowych sieci elektroenergetycznych jest istotnym elementem zapewnienia zdatności do lotu w procesie eksploatacji statków powietrznych. Powyższe stwierdzenie nabiera dodatkowego znaczenia z uwagi na zmiany starzeniowe systemów elektroenergetycznych statków powietrznych.

Wykonane badania i analizy określające możliwości układu zasilania elektrycznego prądu stałego samolotów Su-22 do samoregulacji zgodnie z wymaganiami [18] wykazały, że:

- wartość impulsu zastępczego zanikowego napięcia stałego identyfikuje okres zdatności eksploatacyjnej sieci elektroenergetycznych prądu stałego statków powietrznych,
- badania w warunkach rzeczywistych, w czasie próby silnika na samolocie Su-22, parametrów stanów przejściowych sieci elektroenergetycznych prądu stałego potwierdzają skuteczność i przydatność zastosowanej metody w procesie eksploatacji statków powietrznych.

Przedstawione badania diagnostyczne systemów elektroenergetycznych prądu stałego statku powietrznego pozwalają na szybkie i skuteczne określenie zdolności układu zasilania elektrycznego poszczególnych sieci do samoregulacji napięcia prądu stałego.

Biorąc powyższe pod uwagę, systematyczna diagnostyka i ocena systemów elektroenergetycznych prądu stałego statku powietrznego w zakresie stanu nieustalonego umożliwia skuteczną prognozę niezawodnej pracy sieci elektroenergetycznych prądu stałego oraz wpływa na polepszenie bezpieczeństwa latania.

6. Literatura

1. M. Dzik, „Bezpieczeństwo lotów w lotnictwie wojskowym – czynniki i okoliczności wpływające na powstawanie wypadków i incydentów lotniczych,” *Obronność – Zeszyty Naukowe Wydziału Zarządzania i Dowodzenia Akademii Obrony Narodowej*, nr 1(5), s. 73-91, 2013.
2. M. Nowakowski, M. Zieja, T. Ewertowski and A. Żyłuk, „Badanie udziału czynnika ludzkiego z wykorzystaniem modelu taksonomii przyczyn zdarzeń lotniczych,” *Autobusy – Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe* nr 12/2016.

3. J.C. Price and J.S. Forrest, *Practical Airport Operations. Safety, and Emergency Management*. Elsevier, 2016.
4. M. Zieja and P. Gołda, „Wybrane aspekty systemu zarządzania bezpieczeństwem,” *Logistyka* 4/2014.
5. M. Zieja, *Prognozowanie trwałości wybranych urządzeń osprzętu lotniczego w aspekcie procesów starzenia*. Praca doktorska (PhD Thesis), Warszawa, 2008.
6. J.P. de Abreu, J.S. de Sa, and C.C. Prado, “Harmonic voltage distortion in isolated electric systems,” In Proc. 7th International Conference „Electrical Power Quality and Utilization”, Kraków 2003, p. 469-472.
7. D.N. Sapiro, *Elektroaboruowanije somolietov*, Wyd. Maszynostrojenie. Moscow 1977.
8. J. Brombach, A. Lucken, B. Nya, M. Johannsen, and D. Schulz, “Comparison of different electrical HVDC-architectures for aircraft application. Electrical Systems for Aircraft,” *Railway and Ship Propulsion (ESARS)*, pp. 1-6, Oct. 2012
9. S. Danielecki and S. Tkaczuk, „Eksplorowanie samolotów jako dyscyplina wiedzy po 100 latach doświadczeń,” *Biuletyn WAT*, Vol. LXIV, nr 4, 2015.
10. B. Sarlioglu and C.T. Morris, “More Electric Aircraft: Review, Challenges, and Opportunities for Commercial Transport Aircraft,” *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, Vol. 1, pp. 54-64, 2015.
11. L. Setlak and E. Ruda, „Współczesne rozwiązania technologiczne, analiza i symulacja wybranych komponentów architektury HVDC samolotów zgodnych z koncepcją MEA/ AEA,” *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 2/2017.
12. X. Zhao, J.M. Guerrero and Wu Xiaohao, “Review of Aircraft Electric Power Systems and Architectures,” presented at International Energy Conference (ENERGYCON), IEEE, 2014.
13. MIL-STD-704F (W/ Change-1): *Department of Defense INTERFACE Standard: Aircraft Electric Power Characteristics* (05-Dec-2016).
14. A. Leśniczak et al, „Kompleksowa ocena stanu technicznego samolotów Su-22 na podstawie wyników badań i weryfikacji wykonanych w procesie remontu weryfikacyjnego oraz opracowanie zaleceń profilaktycznych do eksploatacji samolotów po remoncie,” Air Force Institute of Technology, Tech. Report, BT ITWL 1830/I, Warszawa 2018.
15. T. Tokarski, „Kształtowanie charakterystyk komutatorowej prądnicy prądu stałego statku powietrznego,” Rozprawa doktorska (PhD Thesis) 561/506 BT ITWL, Warszawa, 2023.
16. A. Gębura and T. Tokarski, „Cechy diagnostyczne parametrów napięcia wyjściowego lotniczych prądnic pokładowych prądu stałego,” *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej* nr 213, Mechanika z. 63, Awionika, tom 2, p. 239-340, 2004.

17. A. Gębura and T. Tokarski, „Wybrane problemy sterowania pokładowymi systemami prądu stałego i przemiennego,” *Prace Naukowe Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych*, Vol. 36, Iss. 36, p. 87-108, Warszawa 2015.
18. Norma Obronna NO-15-A200: *Wojskowe statki powietrzne – Pokładowe układy zasilania elektrycznego – Podstawowe parametry, wymagania i badania*. 2016 [Polish Military Standard].
19. A. Szelmanowski, K. Głyda, T. Tokarski, T. Gajewski, M. Kalisiak and A. Sekuła, „Protokół Nr 68/43/15 – Badania możliwości samoczynnego zadziałania instalacji przeciwpożarowej SSP-FK śmigłowca Mi-8 nr 660 przy zaniku/spadku napięcia zasilania,” Air Force Institute of Technology, Tech. Report, Warszawa, 2015.
20. A. Szelmanowski, M. Zieja, K. Głyda and T. Tokarski, “Research method of dynamic capability of an actuating block of the SSP-FK aircraft fire suppression system in false alarm aspect,” *Journal of KONES*, Vol. 23, pp. 525-532, 2016.
21. J. Lewitowicz, *Podstawy eksploatacji statków powietrznych – Badania eksploatacyjne statków powietrznych*. Warszawa: Wyd. ITWL, 2007.
22. J. Lewitowicz, *Podstawy eksploatacji statków powietrznych. Tom 6: Eksploatacyjne problemy w projektowaniu i modernizacji statków powietrznych*. Warszawa: Wyd. ITWL, 2012.
23. R. Zadencki, „Analiza uszkodzeń samolotów wielozadaniowych F-16 Block 52+ podczas ich eksploatacji,” Rozprawa doktorska (PhD Thesis), Politechnika Poznańska, 2020.
24. W. Kulebakin, W. Morozowski and J. Sindiejew, *Lotnicze elektroenergetyczne urządzenia pokładowe*. Wydawnictwo Ministerstwa Obrony Narodowej, Warszawa 1958.
25. K. Baranowski and A. Welo, *Symulacja układów elektronicznych*. Spice Design Center, Warszawa: Mikom, 1996.
26. S. Bolkowski, *Elektrotechnika*. Warszawa: Wydawnictwo Szkolne i Pedagogiczne S.A., 2005.
27. A. Gębura and T. Radoń, „Output voltage pulsation as source of diagnostic information about commutator-type DC generators,” *Research Works of Air Force Institute of Technology*, No. 33, p. 75-93, 2013.
28. T. Glinka, *Maszyny elektryczne i transformatory – Podstawy teoretyczne, eksploatacja i diagnostyka*. Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych. Katowice: Komel, 2015.
29. A. Sołbut, *Maszyny elektryczne 2 – Maszyny prądu stałego, maszyny synchroniczne*. Białystok: Oficyna Wyd. Politechniki Białostockiej, 2019.
30. T. Tokarski and A. Gębura, „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

- badania wykonanych w czasie remontu weryfikacyjnego. Sprawozdanie Nr 177/OP/43/16,” Air Force Institute of Technology, Tech. Report, BT ITWL 8623/50, Warszawa, 2016.
31. DWL Lot. 2358/84: *Samolot 54K Książka 8, Osprzęt, Część IV: Technologia obsługi okresowych. Wyposażenie elektryczne*. Poznań 1987.
 32. J. Lewitowicz, A. Szelmanowski, A. Gębura, A. Pazur, E. Franczuk and T. Tokarski, „Badanie zjawiska zniekształceń stref magnetycznie obojętnych w lotniczych komutatorowych prądnicach prądu stałego,” *Przegląd Elektrotechniczny*, p. 78-81, R 95 nr 11/2019.
 33. T. Tokarski, “Evaluation of direct current electric power systems of the aircraft based on characteristics of a transient state,” *Diagnostyka*, Vol. 20, No 1, 81-91, 2019.
 34. J. Żurek, M. Zieja, T. Niezgoda, „Procesy starzenia jako podstawowy aspekt prognozowania niezawodności i trwałości urządzeń osprzętu lotniczego,” *Journal of KONBiN*, Vol. 8 (1), 233-240, 2008. DOI: 10.2478/v10040-008-0116-5.

