

Ppłk dr inż. Andrzej Gębura  
Inż. Tomasz Tokarski  
Por. mgr inż. Tomasz Radoń  
Adam Kobylański

Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych

## Uszkodzenia wiązek przewodów elektrycznych statków powietrznych

Sieć elektryczna statku powietrznego łączy odbiorniki ze źródłami energii elektrycznej. Elementami sieci są agregaty elektryczne (źródła, odbiorniki) oraz wiązki: przewody, izolacja, końcówki, zaciśki i złącza. Ze względów ekonomicznych, na przełomie XX i XXI wieku przedłuża się okresy eksploatacji starszych typów statków powietrznych. Pojawia się zatem pytanie: po upływie jakiego czasu należy wymieniać wiązki, aby zapobiec zagrożeniom, jakie mogą spowodować ich uszkodzenia?

Aby odpowiedzieć na to pytanie, prowadzone są badania lotniczych wiązek elektrycznych, wykorzystujące coraz nowocześniejsze metody diagnostyczne oraz doświadczenia zdobyte podczas przedłużania resursów statków powietrznych. Impulsem do zwiększenia intensywności badań w tej dziedzinie stały się też informacje i publikacje środowisk lotniczych USA o awariach i katastrofach statków powietrznych wywołanych – powstałymi na skutek procesów starzeniowych – uszkodzeniami wiązek lotniczych. Nierzadkie są przypadki występowania mikropęknięć na wiązkach przewodów, które mogą być przyczyną samozadziałania lub niezadziałania a nawet pożaru statku powietrznego.

W laboratoriach Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych wykonuje się testy, których celem jest analiza przebiegu procesów starzeniowych lotniczych przewodów elektrycznych. Testy te pozwalają prognozować uszkodzenia, które mogą wystąpić w ciągu dalszej eksploatacji przewodów. W artykule przedstawiono wyniki dotychczasowych doświadczeń, które przeprowadzono w ITWL.

### Rodzaje i przyczyny uszkodzeń lotniczych wiązek elektrycznych

Podstawowym rodzajem uszkodzeń lotniczych wiązek elektrycznych są **uszkodzenia końcówek**. Przyczyna znacznej części uszkodzeń tych elementów tkwi m.in. w przestarzałych technologiach konstrukcji i montażu omawianych elementów, np. w sposobie ich łączenia z żyłą przewodzącą przewodów. W krajach zachodnich od wielu lat wykorzystuje się technologię zaciskania końcówek nawet najmniejszych elementów, podczas gdy w naszym lotnictwie powszechnie stosuje się lutowanie. Lutowanie powoduje przeszywnienie skrętki drutów żyły przewodzącej w pobliżu końcówki, co przy wibracjach oddziałujących na przewody w czasie lotu, prowadzi do ich pęknięcia.

Wibracje powodują również uszkodzenia kolków akumulatorowych, czego następstwem są iskrzenia i wypalanie się styków.

Lokalne przebiecia powierzchniowe, wywołane wilgocią przenikającą w przypadku niedokładnego skręcenia złącza, powodują **uszkodzenia kolków złączy elektrycznych**



Uszkodzony przewód elektryczny z końcówką do prądnicy GS-18 z samolotu An-26



Półfabrykat końcówki przewodu do prądnicy GS-18 wykonany w ITWL



Elektryczne kołki akumulatorowe o różnym stopniu zużycia

**akumulatorowych.** Przebiecia pozostawiają ślady w postaci mostków węglowych, które stają się źródłem upływu prądu lub kolejnych przebiegów, towarzyszących chwilowym wzrostom napięcia w sieci (nawet po odparowaniu wilgoci).

Niektóre **uszkodzenia przewodów elektrycznych** powodują opiłki i cząstki metalo-



Rozłączone złącze elektryczne z widocznymi śladami przebiegów

we, które pozostają po pracach mechanicznych lub powstają w wyniku ocierania przewodów o elementy konstrukcji. Zanieczyszczenia takie uszkadzają izolację i przewody, powodując zwarcia. **Uszkodzenia izolacji przewodów elektrycznych** są skutkiem oddziaływania zjawisk mechanicznych, termicznych lub elektrycznych (przeciążenia).



Opiłki metali w wiązce elektrycznej

W czasie długotrwałego postoju statków powietrznych wiązki przewodów mogą być uszkodzane przez gryzonie.



Wiązka elektryczna uszkodzona przez szczury

### Metody zapobiegania uszkodzeniom lotniczym przewodów elektrycznych

W ramach działalności ITWL, związanej z przedłużaniem resursów statków powietrznych, przeprowadza się przeglądy kołków akumulatorowych i dzięki temu zapobiega się uszkodzeniom wywoływanym przez wibracje.

Wyniki przeglądów prowadzą do wniosku, że taniej – i przede wszystkim bezpieczniej – byłoby zastosować **połączenia rozłączne**, w których elementy stykowe (rozmontowane na kostce izolacyjnej), połączone z elastycznymi przewodami, są podłączane do baterii akumulatorowej za pomocą połączenia mechanicznego (takie rozwiązanie jest stosowane w lotnictwie państw zachodnich). Przemieszczenia baterii nie wpływają wówczas na jakość połączenia elektrycznego (elastyczne przewody umożliwiają swobodny ruch).

Aby zapobiegać uszkodzeniom izolatorów złączy hermetycznych, w lotnictwie morskim państw zachodnich stosuje się **żele**, włączane pomiędzy obie części złącza przed skręceniem. Żel nie tylko wypełnia mikronierówności, ale także oczyszcza styki elektryczne.

Wypróbowaną metodą zapobiegania skutkom zanieczyszczeń jest po prostu przestrzeganie zasad czystości, natomiast przed gryzoniami lotnicze przewody elektryczne zabezpiecza się, zamykając wzierniki i pokrywy oraz zakładając na samoloty pokrowce.

### Monitorowanie stanu technicznego wiązek elektrycznych

Podczas prac związanych z realizacją programu zwiększania zasobów, wykazano zły stan wielu elementów instalacji elektroenergetycznych statków powietrznych. Zakłady remontowe i jednostki z nimi współpracujące nie są jednak wyposażone w odpowiednią aparaturę i nie mają na tyle dużego doświadczenia, by prawidłowo ocenić stopień zużycia przewodów elektrycznych o zmniejszonych parametrach elektrycznych i mechanicznych wiązek.

#### W czasie remontów i eksploatacji:

- przeprowadza się pomiary rezystancji megomierzem indukcyjnym lub indukcyjnym z prostownikiem o napięciu probierczym 600 V,
- dokonuje się oględzin zewnętrznych wiązek przewodów elektrycznych (wymienia-

ne są przewody z widocznymi śladami przebarwień, pęknięć powierzchniowych izolacji itp.),

- wymienia się wiązki zgodnie z kalendarzem lub godzinami nalotu, np. w samolotach *Su-22* wymieniane są przewody w drążkach sterujących, w miejscach narażonych na duże ugięcia (np. w miejscu połączenia dźwigara skrzydła z kadłubem – połączenie sworzniowe) oraz na goleniach podwozia (w czasie każdego remontu).

### Zjawisko starzenia się lotniczych przewodów elektrycznych charakteryzuje się:

- zmianami starzeniowymi zauważalnymi po upływie okresu dłuższego niż czas jednego „pokolenia obsługującego”;
- rezystancją izolacji przewodów eksploatacyjnych statków powietrznych kilkukrotnie niższą od rezystancji izolacji nowych przewodów;
- zmianami niezauważalnymi w czasie eksploatacji, do których obserwacji niezbędna jest specjalna aparatura;
- zależnością szybkości procesów starzeniowych od wielu czynników (skutki oddziaływania tych czynników najlepiej widoczne są w przypadku dużej liczby statków powietrznych, np. Sił Powietrznych USA).

Skutki starzenia się lotniczych przewodów elektrycznych pojawiają się w szczególnych okolicznościach (np. w przypadku dużej wilgotności lub/i wysokiej temperatury w otoczeniu wiązek, przy szczególnej konfiguracji włączeń agregatów oraz przy wysokim poziomie wibracji).

### Ocena żywotności przewodów dokonywana metodą przyspieszonego starzenia

Badania nad określeniem zasobu pracy statków powietrznych zaczynają prowadzić duże renomowane ośrodki badawcze (m.in. Sandia National Labs). W lotnictwie Sił

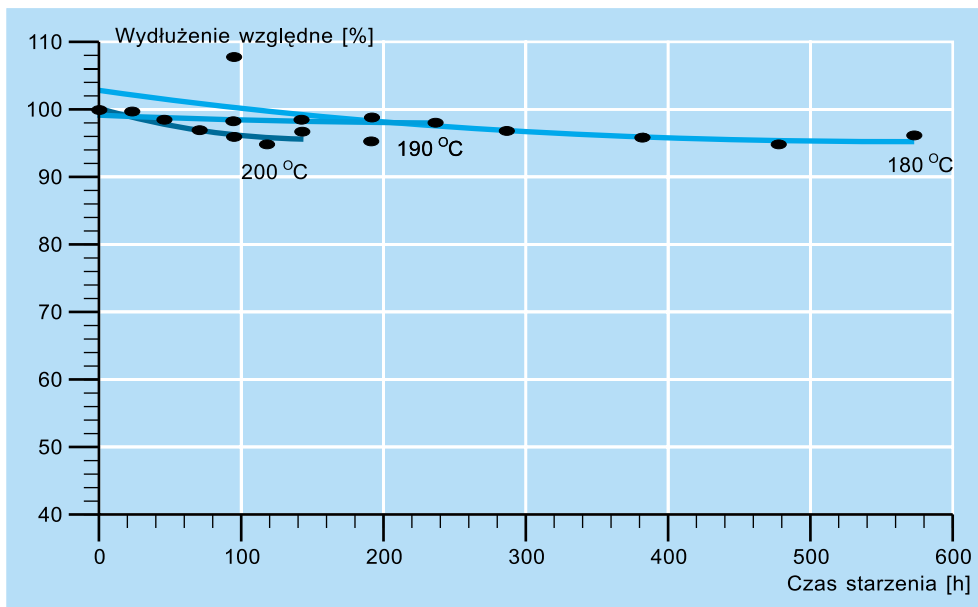
Zbrojnych RP przedłużanie resursów samolotów, w tym wiązek przewodów elektrycznych, wynika z przyczyn ekonomicznych oraz z konieczności zapewnienia bezpieczeństwa latania. Aby w sposób optymalny spełnić oba te – sprzeczne ze sobą – wymagania, musi być precyzyjnie określony czas dopuszczalnej eksploatacji (zapasu rewersowego) przewodów. Jednak bez specjalistycznych badań podstawowych nad zjawiskami starzeniowymi zachodzącymi w przewodach elektrycznych określenie zapasu rewersowego jest niedokładne.

Jedną z ważnych cech układów izolacyjnych jest ich odporność cieplna, którą ocenia się podczas procesu przyspieszonego starzenia cieplnego. Odporność cieplna materiałów organicznych stałych jest określana na podstawie charakterystyki trwałości, nazywanej charakterystyką życia izolacji. Na podstawie wykresu wyznacza się trwałość izolacji w przyjętych warunkach roboczych (np. w takiej temperaturze, jaka wytwarza się w otoczeniu kabla podczas pracy silnika) bądź też przy zadanej trwałości określa się

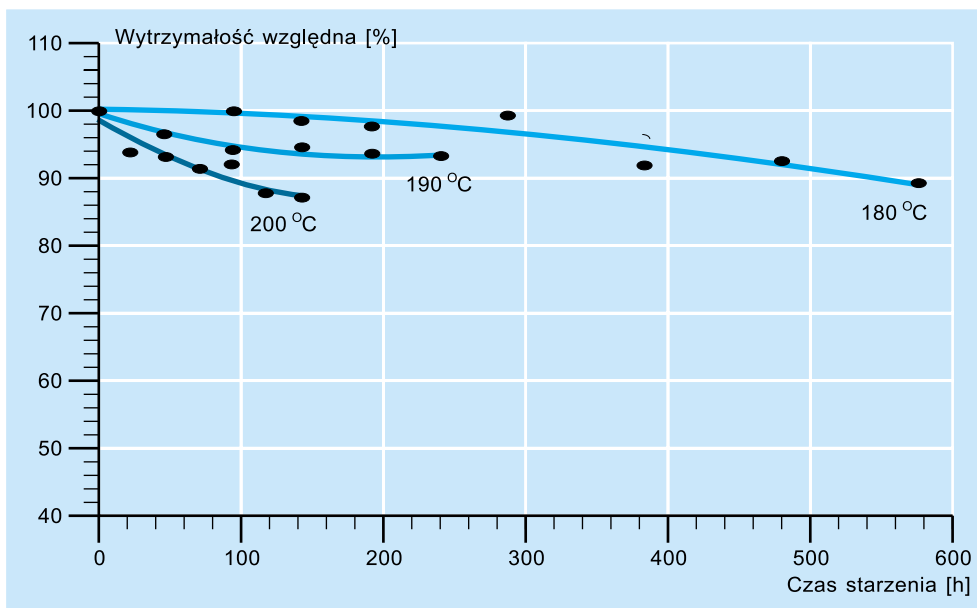
najwyższą dopuszczalną temperaturę pracy ciągłej lub wskaźnik temperaturowy (są to zależności opracowane przez szwedzkiego uczonego Arrheniusa). Dotychczas metodę tę stosowano do określania żywotności nowych przewodów elektrycznych. W ITWL trwają prace nad wykorzystaniem tej metody do określenia zasobu pracy wiązek elektrycznych w eksploatowanych statkach powietrznych. Rozważana jest możliwość rozszerzenia procesu przyspieszonego starzenia o badanie oddziaływania innych czynników, np. wibracji, przeciążeń prądowych oraz płynów i ich oparów.

Stwierdzono, że parametry wydłużenia względnego izolacji i wytrzymałości na rozciąganie ulegają pogorszeniu w czasie starzenia cieplnego. Z chwilą przekroczenia pewnych poziomów granicznych przewod musi być wymieniony na nowy.

Nie stwierdzono dotąd zależności liniowej pomiędzy wartością rezystancji izolacji a czasem procesu przyspieszonego starzenia. Nie należy jednak wnioskować, że pomiary rezystancji są nieprzydatne – jak wynika np. z pro-



Względne zmiany wytrzymałości na rozciąganie izolacji przewodu M-ZN 2019 po badaniach w temperaturach ekspozycji 200°C, 190°C i 180°C



Zmiany wydłużenia względnego na rozciąganie izolacji przewodu *M-ZN 2019* po badaniach w temperaturach ekspozycji 200°C, 190°C i 180°C

tokółów dotyczących przedłużenia resursów śmigłowców *Mi-8* – kilkakrotnie umożliwiły one lokalizację uszkodzonych ekranowanych przewodów doprowadzających<sup>1</sup> energię elektryczną do instalacji ogrzewania łopat nośnych. Przypadki te nie dotyczyły jednak typowych zmian struktury fizykochemicznej przewodów lotniczych powstałych na skutek starzenia cieplnego, lecz uszkodzeń mechanicznych spowodowanych wbijaniem się pękniętych elementów ekranu w izolację przewodów elektrycznych.

Badaniom podlegają przewody wybranych typów, po określonym czasie eksploatacji na statku powietrznym. Ich właściwości mechaniczne i elektryczne porównuje się z właściwościami przewodów nowych i przewodów poddanych laboratoryjnemu procesowi przyspieszonego starzenia (w różnych etapach tego procesu). W taki sposób możliwe będzie

w przyszłości dosyć precyzyjne określanie poziomów zużycia okablowania pokładowego. Zastosowana w ITWL metoda polega na badaniu procesu przyspieszonego starzenia próbek przewodów demontowanych<sup>2</sup> w czasie remontu statku powietrznego. Przy znanej mapie rozkładu temperatur<sup>3</sup> w poszczególnych wiązkach oraz precyzyjnie określonym czasie lotów, a także na podstawie wyników badań prowadzonych metodą przyspieszonego starzenia zdemontowanych przewodów możliwe będzie określenie, jaki zasób pracy (liczba godzin lotu) można przyjąć dla pozostałych przewodów. Na końcówkach przewodów należy nakleić termometry paskowe w celu pomiaru maksymalnych temperatur występujących w czasie pracy węzła energetycznego zarówno na ziemi, jak i w powietrzu. Uzyskane w ten sposób dane umożliwią dokładne dobranie diagramu temperaturowo-czasowe-

<sup>1</sup> Wiązki przewodów pomiędzy stycznikami w przedziale transportowym a przekładnią główną.

<sup>2</sup> Dokonywana jest tzw. weryfikacja przewodów elektrycznych, opierająca się na wynikach oględzin zewnętrznego stanu powierzchni przewodów.

<sup>3</sup> Korzystne byłyby obserwacje temperatur wiązek otrzymywanych z termometrów paskowych naklejanych na poszczególne wiązki.

go procesu przyspieszonego starzenia, a więc i precyzyjne ustalenie zapasu rewersowego elektrycznych przewodów lotniczych.

### Wnioski

- uszkodzenia wiązek elektrycznych, powstające w miarę upływu czasu eksploatacji wiązek, mogą stać się przyczyną niebezpiecznych zjawisk, ze skutkami katastroficznymi włącznie,
- badania laboratoryjne prowadzone metodą przyspieszonego starzenia pozwalają na

precyzyjne określenie żywotności izolacji przewodów lotniczych,

- złącza i końcówki wiązek eksploatowanych na statkach powietrznych produkcji radzieckiej wymagają gruntownych zabiegów konserwacyjnych,
- przeglądy i oceny, dokonywane przez ITWL w ramach przedłużania rewersów, wykazują coraz gorszy stan wiązek elektrycznych – niezbędne mogą być wkrótce zmiany w technologii eksploatacji i wprowadzenie dodatkowych czynności remontowych.

**In the laboratories of the Air Force Institute of Technology there are carried out tests which aim to analyse the course of ageing processes in groups of wires. These tests allow for forecasting damages which may occur during exploitation of wires. In the article there are presented the results of the experiments that had been made in the Institute so far.**



CASA C-295 Sił Powietrznych Hiszpanii. Fot. EADS