

METODY ZLICZANIA CYKLI PRACY LOTNICZYCH SILNIKÓW TURBINOWYCH

RYSZARD CHACHURSKI*, PAWEŁ GŁOWACKI**, STEFAN SZCZECIŃSKI***

Wojskowa Akademia Techniczna*, Urząd Lotnictwa Cywilnego**, Instytut Lotnictwa***

Streszczenie

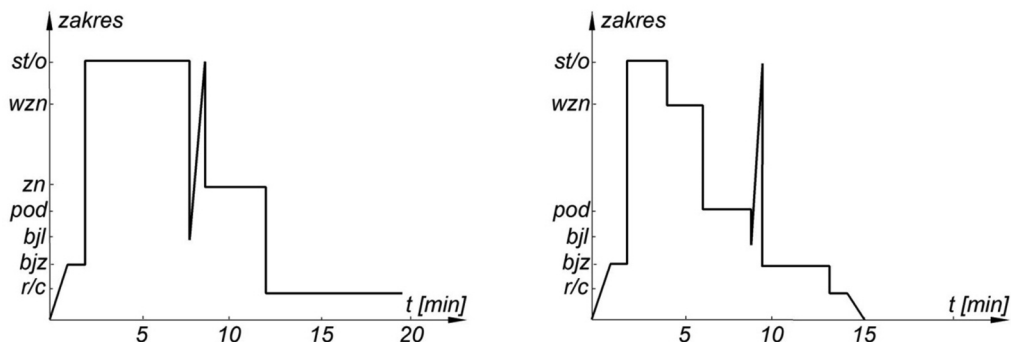
Zagadnienie zmęczenia niskocyklowego jest bardzo istotne z punktu widzenia bezpieczeństwa eksploatacji lotniczych silników turbinowych. W artykule przedstawiono sposoby wyznaczania granicznej liczby cykli stosowane w lotnictwie USA, a także metody zliczania cykli pracy silnika turbinowego w celu określenia pozostałości czasu jego bezpiecznej eksploatacji (resursu) wyrażonego w cyklach. Opisano metody wykorzystywane podczas użytkowania zarówno silników starszych typów, jak i współczesnych.

Słowa kluczowe: silnik lotniczy, silnik turbinowy, zmęczenie niskocyklowe, liczba cykli

W opracowaniu *Zmęczenie niskocyklowe konstrukcji i jego minimalizacja* opublikowanym w zeszycie nr 199/2009 Prac Instytutu Lotnictwa przedstawiono schematycznie obciążenia działające na elementy „gorącej części” lotniczych silników turbinowych w zależności od warunków i zakresów ich pracy wpływające na niskocyklowe zmęczenie konstrukcji. Podkreślono w nim, że spostrzeżenia dotyczące obciążeń o takim charakterze doprowadziły do wyrażania czasu bezpiecznej eksploatacji silników nie tylko w godzinach, ale i w cyklach. Sposoby wyznaczania liczby cykli „zużytych” przez główne moduły silników i ich najważniejsze z punktu widzenia bezpieczeństwa eksploatacji części, a także granicznie dopuszczalne wartości liczby cykli pracy wymagające wymiany modułów lub poszczególnych części narzucane są użytkownikom przez producentów silników. Są one wstępnie ustalane na podstawie badań zmęczeniowych standardowych próbek materiałów konstrukcyjnych, a następnie w wyniku badań zmęczeniowych gotowych części i prób całych silników. Niniejsze opracowanie stanowi uzupełnienie poruszanej uprzednio tematyki o stosowane w praktyce eksploatacyjnej metodyki obliczeniowe wyznaczania przebytych liczb cykli przez analizowany silnik i jego podzespoły.

SPOSOBY OKREŚLANIA GRANICZNEJ LICZBY CYKLI

W lotnictwie USA dla silników samolotów pasażerskich prowadzi się próby symulujące co najmniej 1000 typowych cykli pracy silnika podczas jego normalnej eksploatacji. Najważniejszymi elementami każdego z cykli jest praca silnika przez określony czas na zakresie startowym oraz na zakresie ciągu odwróconego, a także jego chłodzenie przed wyłączeniem (rys. 1).



Rys. 1. Przykładowe cykle pracy silników samolotów pasażerskich realizowane w trakcie prób (składających się z 1000 cykli) symulujących typowe cykle ich pracy podczas normalnej eksploatacji. Zakresy pracy silnika oznaczono jako: r/c – rozruch lub chłodzenie, b/jz – bieg jałowy na ziemi, bjl – bieg jałowy w locie, pod – podejście do lądowania, zn – zniżanie, wzn – wznoszenie, st/o – start lub włączenie odwracacza ciągu

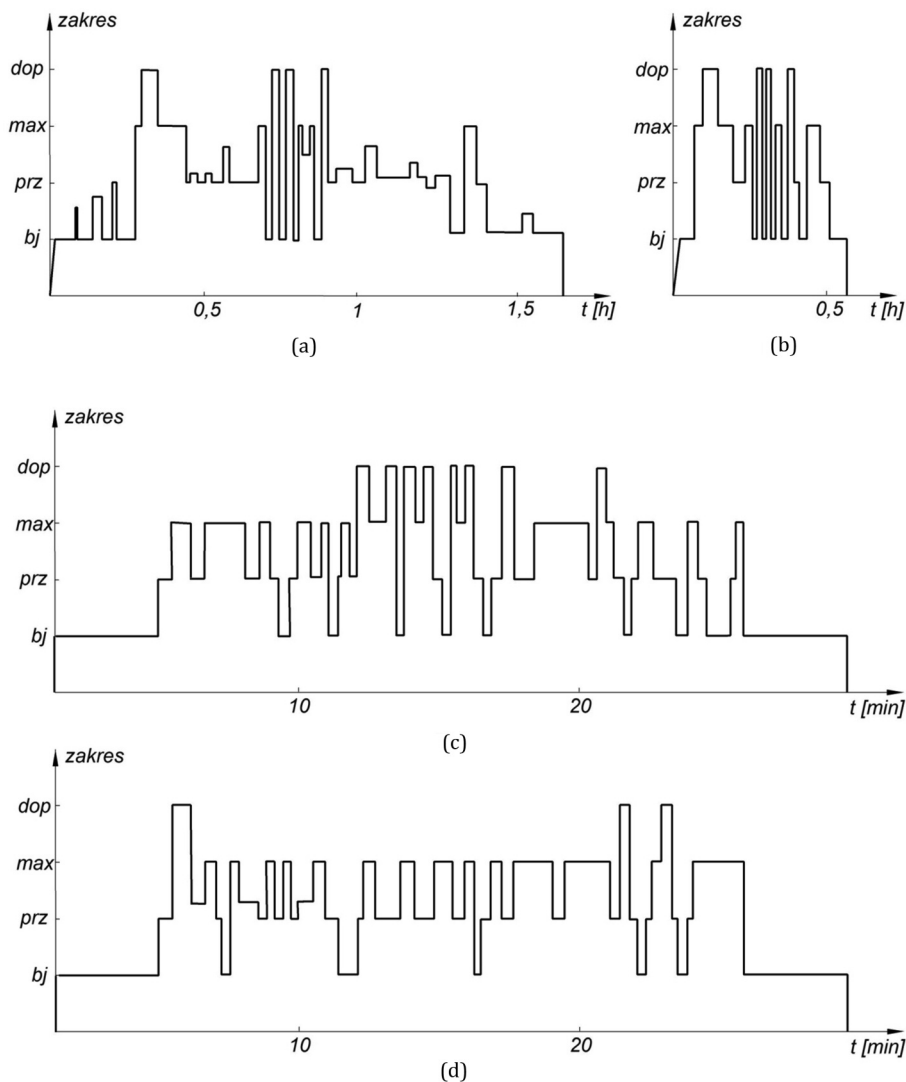
W przypadku silników wielozadaniowych samolotów bojowych do określania granicznej liczby cykli stosuje się współcześnie próby oparte na analizie warunków pracy silników w trakcie typowych misji. Jednocześnie, dla skrócenia czasu trwania prób, silniki podczas ich trwania pracują tylko na zakresach, które mają istotne znaczenie w procesie zużycia zmęczeniowego, tzn. ogranicza się występujące w każdej z misji okresy ich pracy na zakresie biegu jałowego i przelotowym (rys. 2).

Dla silników śmigłowych i śmigłowcowych w celu określenia trwałości niskocyklowej nie prowadzi się skróconych prób opartych na analizie misji, natomiast wykonuje się specjalne próby o czasie trwania pojedynczego cyklu wynoszącym 15 minut wg programu zamieszczonego w tab. 1 [3].

Tab. 1. Przebieg próby niskocyklowej silników śmigłowych i śmigłowcowych lotnictwa USA

Zakres pracy silnika	Czas [s]
Rozruch	30
Bieg jałowy	120
Akceleracja do zakresu maksymalnego	6
Zakres maksymalny	150
Deceleracja do zakresu biegu jałowego	6
Bieg jałowy	180
Akceleracja do zakresu maksymalnego ciągłego (przelotowego)	6
Maksymalny ciągły (przelotowy)	150
Deceleracja do zakresu biegu jałowego	6
Bieg jałowy	120
Chłodzenie i wyłączenie silnika	126

Dla tarczy nośnej turbiny wysokiego ciśnienia takiego silnika zakłada się prawdopodobieństwo bezawaryjnej pracy na poziomie 99,9%. Korzystając z rozkładu funkcji prawdopodobieństwa oraz odpowiednich mnożników, ustalono, że można przyjąć trwałość zmęczeniową takiej tarczy równą np. 4000 cykli, jeśli dla trzech egzemplarzy badanych tarcz przeprowadzono próby zmęczeniowe, które pozwoliły uzyskać co najmniej 36630 cykli bezawaryjnej pracy dla każdej z nich, tj. o rząd wielkości więcej niż ustalona przez producenta trwałość¹.



Rys. 2. Sposób uwzględnienia obciążeń zmęczeniowych w oparciu o analizę zakresów pracy silnika samolotu bojowego podczas typowej misji (a) skróconej próby jego silnika (b) oraz przykładowy przebieg próby odpowiadającej walce powietrznej (c) i misji wsparcia pola walki (d).

Zakresy pracy silnika oznaczono jako: bj – bieg jałowy, prz – przelotowy, max – maksymalny bez dopalania, dop – maksymalny z dopalaniem

¹Świadczy to tym, że obowiązujące obecnie metodyki wyznaczania bezpiecznej liczby cykli zmęczeniowych wymagają dalszych badań uściślających.

Liczby cykli pracy zakładanych wspólnie na etapie wykonywania projektu wstępnego silnika dla różnego rodzaju statków powietrznych lotnictwa USA podano w tab. 2.

Tab. 2. Liczby cykli pracy zakładanych wspólnie na etapie wykonywania projektu wstępnego silnika dla różnego rodzaju statków powietrznych lotnictwa wojskowego USA

Rodzaj statku powietrznego	Moduły silnika	Cykle I rodzaju	Cykle III rodzaju	Cykle IV rodzaju	Włączenie dopalacza lub odwracacza ciągu
Myśliwski	W...S	3200	20000	24000	17000
	KS...UW	1600	10000	12000	8500
Bombowy	W...S	2700	30000	30000	16000
	KS...UW	1350	15000	15000	8000
Transportowy	W...S	10000	14000	zostanie ustalane	nie dotyczy
	KS...UW	5000	7000		
Szkolno-treningowy	W...S	15000	150000	150000	
	KS...UW	7500	75000	75000	
Śmigłowiec	W...S	15000	nie dotyczy	nie dotyczy	nie dotyczy
	KS...UW	15000			

gdzie: W – wlot, S – sprężarka, KS – komora spalania, UW – układ wylotowy

Wymieniony w tabeli cykl I-go rodzaju polega na uruchomieniu silnika, osiągnięciu zakresu maksymalnego bez dopalania lub z dopalaniem i wyłączeniu silnika, cykl III-go rodzaju uwzględnia przejście od zakresu biegu jałowego do zakresu maksymalnego bez dopalania lub z dopalaniem i powrót do zakresu biegu jałowego, natomiast cykl IV-go rodzaju to przejście od zakresu przelotowego do zakresu maksymalnego bez dopalania i powrót do zakresu przelotowego².

METODY ZLICZANIA LICZBY CYKLI PRACY SILNIKÓW

Z punktu widzenia eksploatorów silników lotniczych konieczne jest precyzyjne ustalenie sposobu zliczania cykli pracy występujących podczas eksploatacji silnika. Przez pojedynczy pełny cykl pracy silnika rozumie się jego uruchomienie, przejście do zakresu maksymalnego (startowego) i wyłączenie. W przypadku silnika do napędu samolotu pasażerskiego w trakcie pojedynczego lotu wykonuje się uruchomienie silnika, którego części mają temperaturę otoczenia, a następnie prowadzi się jego krótkotrwałe podgrzewanie w celu ustabilizowania rozkładu temperatury w częściach i zespołach silnikowych oraz luzów i pasowań między współpracującymi częściami. Podczas kołowania i oczekiwania na zgodę do startu silnik pracuje na zakresie biegu jałowego lub zbliżonym do niego, po czym osiąga zakres maksymalny lub bliski niemu w trakcie startu i wznoszenia. Na najdłuższym odcinku lotu silnik pracuje na zakresie przelotowym, zmniejszanym podczas zniżania i lądowania do zakresu biegu jałowego. W końcowej fazie pracy silnika włączany jest odwracacz ciągu, następnie samolot dokołuje do płaszczyzny postojowej, po czym następuje wychłodzenie silnika, jego wyłączenie i ostygnięcie do temperatury otoczenia. Dla tak eksploatowanego silnika można w przybliżeniu przyjąć, że w trakcie każdego lotu odbywa się jeden pełny cykl pracy.

²Definicja cyklu II rodzaju nie występuje w dostępnej literaturze, ale też nie są podawane dotyczące go ograniczenia.

W przypadku silnika wielozadaniowego samolotu bojowego, ze względu na sposób korzystania z niego w trakcie lotu, konieczne jest dodatkowo uwzględnianie cząstkowych zmian obciążeń części i zespołów silnika jako wartości składowych pełnego cyklu.

W lotnictwie różnych państw stosowane są różne sposoby zliczania cykli pracy.

W przypadku starszych silników liczby cykli są zliczane „ręcznie” przez personel techniczny na podstawie uproszczonych wzorów lub wręcz umownych wartości wykorzystania cykli pracy odniesionych do godziny lotu w zależności od charakteru misji lotniczej (tab. 3).

Tab. 3. Umowne wartości zużycia liczby cykli pracy w ciągu godziny lotu w zależności od charakteru misji lotniczej wg Rolls-Royce

Rodzaj misji	Liczba cykli na godzinę lotu
Akrobacja zespołowa	10...14
Trening	5...10
Bombardowanie lub ostrzeliwanie celów naziemnych z broni maszynowej	5
Wsparcie wojsk lądowych	3,8
Rozpoznanie powietrzne	3,5

W nowszych konstrukcjach silników zliczanie cykli pracy realizowane jest przez odpowiednie systemy komputerowe na ziemi po wprowadzeniu danych z rejestratorów pokładowych lub bezpośrednio na pokładzie statku powietrznego przez układ monitorowania pracy silnika.

Jedną z najwcześniej opracowanych metod zliczania cykli pracy opartą o zapisy rejestratorów pokładowych jest używana przede wszystkim w Siłach Powietrznych USA metoda obliczania liczby tzw. skumulowanych cykli pracy wyrażanych zależnością

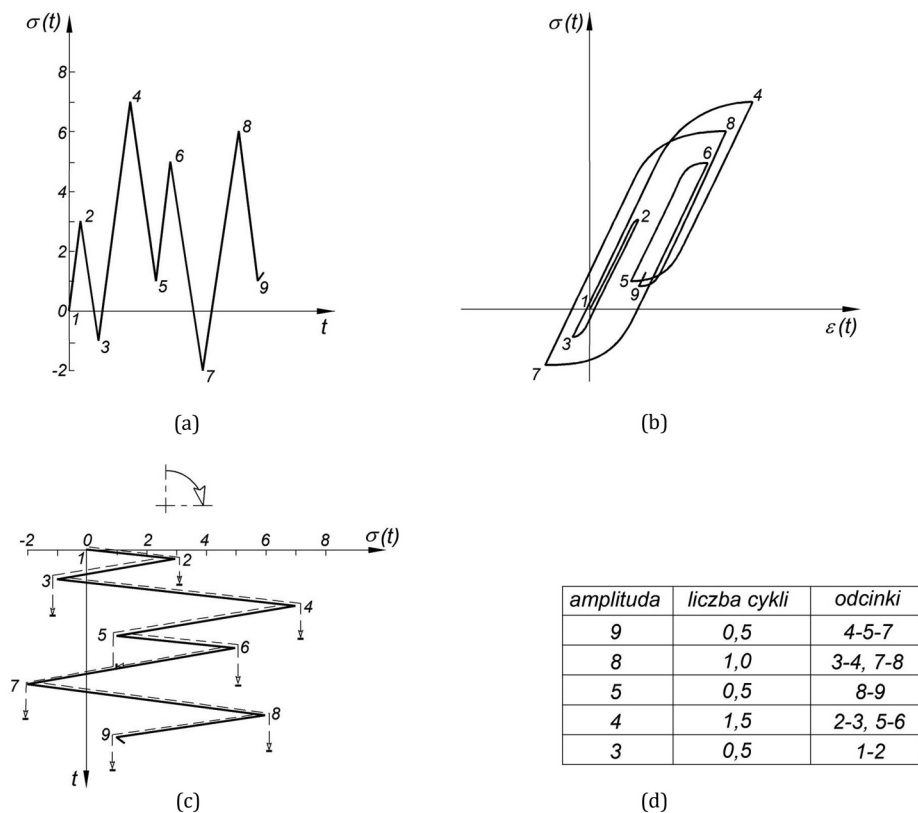
$$c_{TAC} = c_{LCF} + \frac{c_{FTC}}{4} + \frac{c_{CIC}}{40}$$

gdzie:

c_{LCF} – jest liczbą cykli I-go rodzaju, c_{FTC} – liczbą cykli III-go rodzaju, a c_{CIC} – liczbą cykli IV-go rodzaju.

Metoda zliczania skumulowanych cykli pracy tym sposobem stosowana jest np. w trakcie eksploatacji silników F100-PW-229 samolotów F-16.

W niemieckim lotnictwie wojskowym dla silnika RB199 samolotu Panavia Tornado zastosowano inną metodę zliczania cykli – tzw. metodę spływających kropli deszczu (*Rain-Flow*). Metoda ta, której nazwa pochodzi od skojarzenia schematu obliczeń z mechanizmem spływania kropli deszczu z dachu pagody, polega na wyodrębnieniu z zapisu zmian naprężeń w czasie tych z ich amplitud, nad którymi (umownie) spływają krople wody (rys. 3).



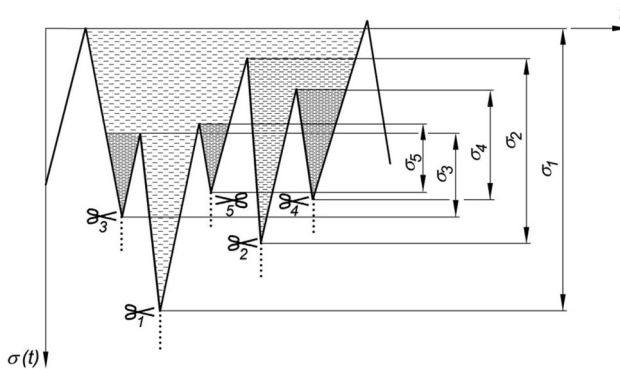
Rys. 3. Schemat zliczenia cykli zmęczeniowych tzw. metodą spływających kropli deszczu:

- (a) – zmiana naprężeń w czasie, (b) – zmiana cykli zmęczeniowych w czasie, (c) – schemat spływania wody z dachu pagody uformowanego przez obrót w prawo wykresu (a) o 90° ,
 (d) – liczba wyznaczonych cykli

Na każdy fragment umownego dachu woda jest wylewana w jego najwyższym położonym punkcie, przy czym najpierw rozpatruje się fragment najbardziej wysunięty, z którego woda spływa na niższe partie dachu, aż do miejsca, z którego jej strumień spływa na umowną ziemię. Amplitudę naprężenia cyklu przedstawia odległość pozioma między punktem początkowym kropli wody, a punktem, w którym spada ona na ziemię. Jeśli kropla wody spływająca z kolejnego punktu startowego nie spływa z fragmentu dachu, lecz dopływa do strumienia wody spływającej z wyższych partii dachu, wówczas amplituda naprężenia jest równa odległości między początkowym punktem kropli, a punktem, w którym napotkała ona spływający z góry strumień wody.

Innym, mającym prostsze reguły, sposobem zliczenia cykli zmęczeniowych jest tzw. metoda zbiornika (*Reservoir*), w której wykres zmian naprężeń w czasie „napęla się wodą” (rys. 4), a następnie otwiera się odpływ wody z najniższego położonego jego punktu (zaznaczono na rys. 4 symbolem nożyczek). Wysokość słupa wypływającej wody odpowiada naprężeniu cyklu. Kolejno opróżniając zbiornik poprzez upuszczanie wody z najniższych położonych punktów zlicza się liczbę cykli o amplitudach naprężeń równych wysokości słupów wody w poszczególnych częściach zbiornika.

Obie metody dają takie same wyniki.



Rys. 4. Schemat zliczania cykli zmęczeniowych tzw. metodą zbiornika: σ_i – amplituda naprężeń, t – czas (symbolem nożyczek oznaczono kolejne miejsca „upuszczania wody”)

Dla silnika RB199 opracowano algorytm obliczeń niskocyklowej trwałości zmęczeniowej bazujący na zarejestrowanych w locie wartościach prędkości obrotowych wirników.

W pierwszej kolejności oblicza się względną prędkość obrotową wirnika odniesioną do wartości prędkości na zakresie maksymalnym bez dopalania

$$\bar{n} = \frac{n}{n_{100\%}}$$

a następnie wydziela się, metodą spływających kropli deszczu, z zapisu prędkości obrotowej rejestratora pokładowego minimalne n_{min} i maksymalne n_{max} jej wartości dla poszczególnych cykli. W dalszej kolejności oblicza się dla każdego cyklu maksymalne i minimalne wartości naprężeń proporcjonalnych do prędkości obrotowych

$$\sigma_{min} \sim n_{min}^2, \sigma_{max} \sim n_{max}^2$$

a potem wartości naprężeń granicznych

$$\sigma_{gr} \sim n_{gr}^2$$

odpowiadające granicznie dopuszczalnej prędkości obrotowej n_{gr} (np. takiej, przy której następuje rozerwanie się wirnika) oraz dopuszczalne wartości naprężeń dla nieograniczonej trwałości zmęczeniowej (powyżej 10^6 cykli)

$$\sigma_{nieogr} = p \cdot \sigma_{gr}$$

gdzie p jest wielkością wyrażającą określony stosunek naprężeń $\frac{\sigma_{nieogr}}{\sigma_{gr}}$

Następnie oblicza się ze wzoru Goodmana naprężenia równoważne cyklu

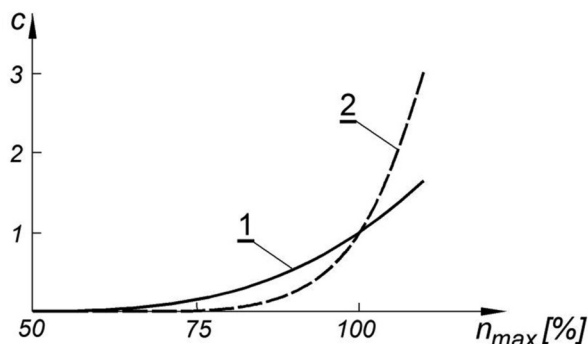
$$\sigma_r = \frac{\sigma_{gr} \cdot (\sigma_{max} - \sigma_{min})}{(\sigma_{gr} - \sigma_{min})}$$

A potem wartość uszkodzenia odpowiadającą określonej prędkości obrotowej wirnika

$$D = \left(\frac{\frac{\sigma_r}{\sigma_{nieogr}} - p}{\frac{1}{\sigma_{nieogr}} - p} \right)^m$$

gdzie m wyznacza się z nachylenia krzywej Wöhlera we współrzędnych $\lg \sigma$ ($\lg C$).

Dla silnika RB199 obliczenia dla wirnika niskiego i wysokiego ciśnienia przeprowadzono osobno przyjmując odpowiednio $n_{gr} = 120\%$, $p = 0,55$ i $m = 3,5$ dla wirnika wysokiego ciśnienia i $n_{gr} = 130\%$, $p = 0,4$ i $m = 2$ dla wirnika niskiego ciśnienia (rys. 5).



Rys. 5. Zależność zużycia cykli zmęczeniowych c od maksymalnej prędkości obrotowej n_{max} wirnika niskiego (1) i wysokiego (2) ciśnienia silnika RB199 w danym cyklu pracy

Z wykresów pokazanych na rys. 5 wynika, że dla wartości prędkości obrotowych wirników niższych od wartości maksymalnych w większym stopniu następuje wykorzystanie cykli zmęczeniowych wirnika niskiego niż wysokiego ciśnienia.

PODSUMOWANIE

Znajomość zjawisk dotyczących wytrzymałości zmęczeniowej części lotniczych silników turbinowych oraz sposobów zliczania liczby cykli pracy zużytych przez te silniki ma z pewnością istotny wpływ na bezpieczeństwo latania.

Wybranie prawidłowej metody zliczania cykli pracy silnika jest tym trudniejsze, że, zwłaszcza w przypadku turbin, nakładają się w nich zmienne w czasie obciążenia mechaniczne (wynikające przede wszystkim z ruchu obrotowego elementów wirnika i zmian jego prędkości obrotowej), ale także termiczne – spowodowane nierównomiernym nagrzaniem części. Dodatkowym problemem jest to, że w zależności od zmian zakresu pracy silnika obciążenia mechaniczne i termiczne mogą być przesunięte w fazie.

W przypadku silników wielowirnikowych, zużycie cykli zmęczeniowych dla każdego z wirników jest inne i powinno być obliczane oddzielnie. Na zakresach pracy mniejszych od maksymalnego wirniki wysokiego ciśnienia zużywają mniej cykli od wirników niskiego ciśnienia.

Należy się spodziewać powstania uściślonej metodyki wyznaczania bezpiecznej dla całości konstrukcji silnika, liczby cykli zmęczeniowych uwzględniających warunki lotu wpływające na wartości rozkładów temperatury w częściach newralgicznych (jak np. tarcze nośne wirników turbin), a więc nie tylko prędkości obrotowe wirników, ale i zmieniające intensywność chłodzenia – wysokość H i prędkość V lotu samolotu.

Oczywiście dane liczbowe przebytych cykli i prognozy co do dalszej bezpiecznej pracy będą zależały od konstrukcji konkretnego typu silnika – będącego zamiennikiem w zastosowaniu na takim samym płatowcu. Na wielu samolotach przewiduje się możliwość wykorzystania różnych typów silników o podobnych osiąгах, np. na samolotach pasażerskich Airbus czy Boeing zamiennie stosuje się silniki firm Pratt&Whitney, Rolls-Royce czy General Electric (SNECMA, CFMI, IAE), podobnie jak na samolotach bojowych F-16 eksploatowane są różne wersje silników F100 produkowanych przez firmę Pratt&Whitney lub F110 firmy General Electric.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Balicki W., Chachurski R., Szczeciński S., *Zmęczenie niskocyklowe konstrukcji i jego minimalizacja*, Prace Instytutu Lotnictwa nr 199, Wydawnictwa Naukowe Instytutu Lotnictwa, Warszawa, 2009
- [2] *Engine Structural Integrity Program (ENSIP)*, Department of Defence, 2002
- [3] Niepokólczycki A., *Fatigue of Aircraft Structures*, Instytut Lotnictwa, Warszawa, 2009
- [4] Orkisz M. (red.), *Turbinowe silniki lotnicze w ujęciu problemowym*, PN-TTE, Lublin, 2000
- [5] Pfoertner H., *Extension of the Usable Engine Life by Modelling and Monitoring*, RTO AVT, Lecture Series on Aging Aircraft Fleets: Structural and Other Subsystem Aspects, Sofia, 2000
- [6] Skalski J., *Ocena wpływu nieustalonych zakresów i warunków pracy turbinowego silnika odrzutowego na wytrzymałość niskocyklową tarczy turbiny*, rozprawa doktorska, WAT, Warszawa, 1994
- [7] Wiśniewski S., *Obciążenia cieplne silników turbinowych*, WKiŁ, Warszawa, 1974
- [8] Vujić D., *Diagnostic system in aircraft engine maintenance*, Scientific Technical Review, Vol. LV, No. 1, Military Technical Institute, Belgrad, 2005
- [9] Zoufaly B., *Obciążenia cieplne łopatek wieńca wirnikowego turbiny lotniczego silnika odrzutowego podczas rozruchu i akceleracji*, rozprawa doktorska, WAT, Warszawa, 1977
- [10] opisy techniczne i instrukcje eksploatacji silników różnych typów