

BADANIA SPEKTRÓW OBCIĄŻEŃ SAMOLOTÓW BEZZAŁOGOWYCH W MISJACH FOTOGRAMETRYCZNYCH

MIROSLAW RODZEWICZ, DOMINIK GŁOWACKI

Politechnika Warszawska, Instytut Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej, Warszawa
e-mail: mirosław.rodzewicz@pw.edu.pl

JAROSŁAW HAJDUK

Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Warszawa

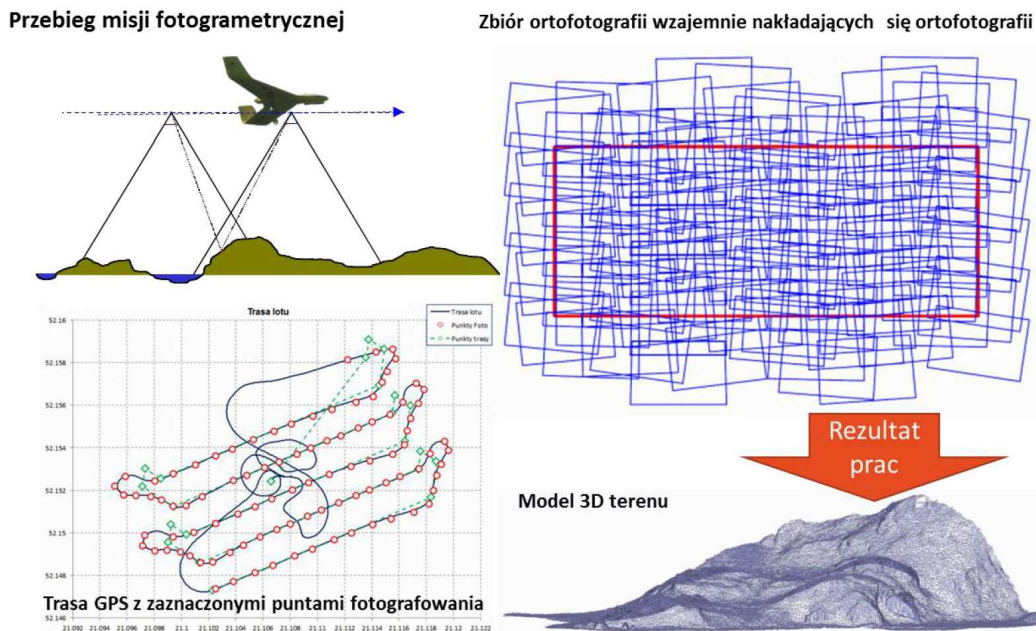
W artykule przedstawiono wyniki badań dotyczące spektrum obciążeń lekkich bezzałogowych statków powietrznych podczas misji fotogrametrycznych. Dane do analiz uzyskano z szeregów czasowych przyspieszeń zarejestrowanych w logach autopilota. Wykorzystano przy tym oryginalne oprogramowanie opracowane w środowisku LabView. Kluczowym elementem tego oprogramowania jest moduł implementujący algorytm Rainflow Counting. Wyniki programu obejmują tablice cykli obciążeń oraz przyrostowe spektra obciążeń zawierające statystyki przyrostów obciążeń o różnej wielkości. Przeprowadzono szczegółowe analizy przyrostowych spektrów obciążeń z wszystkich lotów w celu określenia statystyk częstotliwości występowania różnych przyrostów obciążeń. Na tej podstawie opracowano reprezentatywne spektra obciążeń dla całej sesji lotów, obejmujące wszystkie loty, z różnym poziomem konserwatywności w odniesieniu do szacowania trwałości zmęczeniowej. Zademonstrowano wyniki obliczeń trwałości zmęczeniowej dla opracowanych spektrów obciążeń z wykorzystaniem założonych charakterystyk zmęczeniowych materiału.

1. Wstęp

Szybki rozwój zastosowań bezzałogowych statków powietrznych (BSP) w różnych dziedzinach gospodarki cywilnej oraz w siłach zbrojnych [1-5], a także wykorzystanie przez BSP wspólnej przestrzeni powietrznej sprawia, że bardzo istotne stają się kwestie bezpieczeństwa operacyjnego. Jednym z ważnych aspektów bezpieczeństwa jest trwałość zmęczeniowa konstrukcji BSP. Aby móc oszacować tę trwałość, konieczna jest znajomość widm obciążenia specyficznych dla różnych klas BSP. W niniejszym artykule uwaga autorów została skupiona na misjach fotogrametrycznych. Specyfiką takich misji jest to, że samolot bezzałogowy w trybie automatycznym wykonuje naloty wzdłuż równoległych linii określonych przez punkty siatki fotogrametrycznej wygenerowanej przy projektowaniu trasy lotu. Podczas nalotów wykonywane są seryjnie ortofotografie, przy czym bardzo ważną sprawą jest aby zachodziły one na siebie wzdłuż i w poprzek przynajmniej w 60%, gdyż wówczas programy składające ortofotomapę będą prawidłowo funkcjonować. Postulat wzajemnego nakładania się ortofotografii trzeba uwzględnić dobierając odpowiednią wysokość lotu dla dysponowanej ogniskowej obiektywu kamery fotogrametrycznej i możliwej do zrealizowania częstotliwości wykonywania zdjęć przez systemy kamery i autopilota podającego sygnał wyzwolenia migawki. Ważne jest, aby podczas nalotów wzdłuż linii siatki fotogrametrycznej samolot jak najdokładniej utrzymywał wyznaczoną wysokość lotu.

2. Opis samolotów bezzałogowych użytych w badaniach

Do realizacji misji fotogrametrycznych analizowanych w tym artykule użyto lekkiego samolotu Skywalker X-8 w układzie aerodynamicznym latającego skrzydła. Jest to samolot zbudowa-



Rys. 1. Graficzne ujęcie istoty misji fotogrametrycznej

Dane techniczne

- Struktura: pianka EPP + pręty CFRP
- Rozpiętość: 2120mm
- Długość: 790mm
- Pow. nośna : 80dm²
- Masa startowa: 4000g
- Prędość lotu: 65-70km/h
- Maksymalna długotrwałość: 30min (zależnie od baterii i masy wyposażenia)

Wyposażenie standardowe:

- Silnik elektryczny: [3530 500KV - 5010 810KV](#) (ok. 700W)
- Śmigło: 12x6E
- Serwomechanizmy: x2 17g
- Regulator ESC 60A - 100A
- Akumulatory: LiPo [6s 22.2V 5000-6000mAh](#)
- Rekomendowana metoda startu: katapulta lub gumy startowe
- Lądowania: tradycyjne/ możliwość lądowania na spadochronie (130 dm²)



Rys. 2. Dane techniczne samolotu bezzałogowego Skywalker X-8

ny z zestawów elementów do samodzielnego montażu dostępnych na rynku. Główna struktura wykonana jest z pianki polipropylenowej (EPP) wzmocnionej prętami z kompozytu węglowo-epoksydowego (CFRP). Samolot w podstawowej wersji ma przeznaczenie uniwersalne. Dysponuje dużą przestrzenią ładunkową, umożliwiając użytkownikowi przystosowanie go do specjalistycznych zadań, czyli w naszym wypadku do lotów fotogrametrycznych.

Główne parametry samolotu Skywalker X-8 podane zostały na rys. 2. Samolot ma ponad 2 m rozpiętości, maksymalna masa startowa wynosi 4 kg. Jest to wartość podwyższona o 0.5 kg w stosunku do standardowej wartości zalecanej przez producenta zestawu dzięki zastosowaniu dodatkowych wzmocnień struktury. Czas lotu zależny jest od pojemności akumulatorów elektrycznych, które można zastosować bez przekroczenia dopuszczalnej masy startowej. W przypadku egzemplarza użytego w opisywanych tu badaniach było to ok. 30 min, co przy prędkości przelotowej ok. 70 km/h umożliwiło pokonanie dystansu do 35 km.

W celu przystosowania samolotu do zadań fotogrametrycznych w kadłubie zabudowano specjalne łożo dla kamery fotogrametrycznej. W tym przypadku była to lustrzanka typu Canon 700D wyposażona w stały obiektyw 35 mm i sprzężona z dedykowanym GPS-em. Obiektyw kamery skierowano pionowo w dół, wycinając wcześniej w kadłubie odpowiedni otwór. Otwór ten można było zdalnie zakrywać specjalną klapką kompozytową, która zabezpieczała obiektyw aparatu podczas lądowań i kontaktu z ziemią.

Do sterowania i automatycznej nawigacji w trakcie lotów fotogrametrycznych wykorzystano autopilota typu Micropilot MP 2128 g. Podczas startów i lądowań stosowano wyłącznie sterowanie manualnie. Starty wspomagano naciągniętą liną gumową lub używano lekkiej 3,5-metrowej katalpuly z naciągiem gumowym. Lądowania w sesji lotów fotogrametrycznych realizowano w sposób klasyczny, podchodząc lotem ślizgowym do pasa lądowań, ale dodatkowo przebadano również możliwość lądowania na spadochronie.

3. Źródło i opis danych pomiarowych

Główną funkcją autopilota jest sterowanie samolotem podczas lotu autonomicznego, ale autopilot pełni także funkcję rejestratora parametrów lotu. Rejestrowane są sekwencje czasowe wielu zmiennych, np. pozycji GPS, wysokości lotu, prędkości względem powietrza oraz względem gruntu, przyspieszenia i szereg innych danych. Są one zapisywane w tzw. logach autopilota. Listę parametrów zapisywanych w logach jest przedstawiona na dwóch stronach instrukcji urządzenia (rys. 3). Do opracowania spektrów obciążeń kluczowe znaczenie ma informacja o przyspieszeniu względem osi z (oznaczonego tu jako a_z), gdyż jest to parametr konieczny do obliczenia współczynnika obciążeń. Przebieg czasowy współczynnika obciążeń n_z obliczonego z wartości a_z , r-nie (3.1), traktujemy jako dane wejściowe do procesu obliczeniowego spektrów obciążeń. Warto jednak wiedzieć, w jakich okolicznościach pojawiła się jakaś szczególna wartość tego współczynnika, np. przy jakiej prędkości i na jakiej wysokości, jaka była pozycja samolotu i położenie sterów, itd. Dzięki temu można wydedukować, czy chwilowa wartość n_z mogła mieć związek z ruchem sterów lub była skutkiem turbulencji. Z tego względu warto jest znać przebiegi czasowe także innych parametrów lotu

$$n_z(t) = \frac{a_z(t)}{g} \quad (3.1)$$

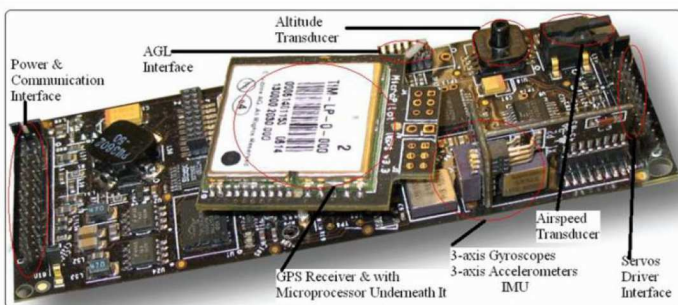
gdzie g [m/s²] to przyspieszenie ziemskie, a t [s] to czas.

Na rys. 4 zamieszczono przykład wybranych danych z logu zarejestrowanego podczas lotu fotogrametrycznego. Pokazany jest ślad GPS, gdzie kolor niebieski oznacza sterowanie ręczne, a kolor zielony sterowanie automatyczne. Na wykresie można zobaczyć również przebieg wysokości oraz sygnał obciążenia.

4. Metody i narzędzia do opracowywania spektrów obciążeń

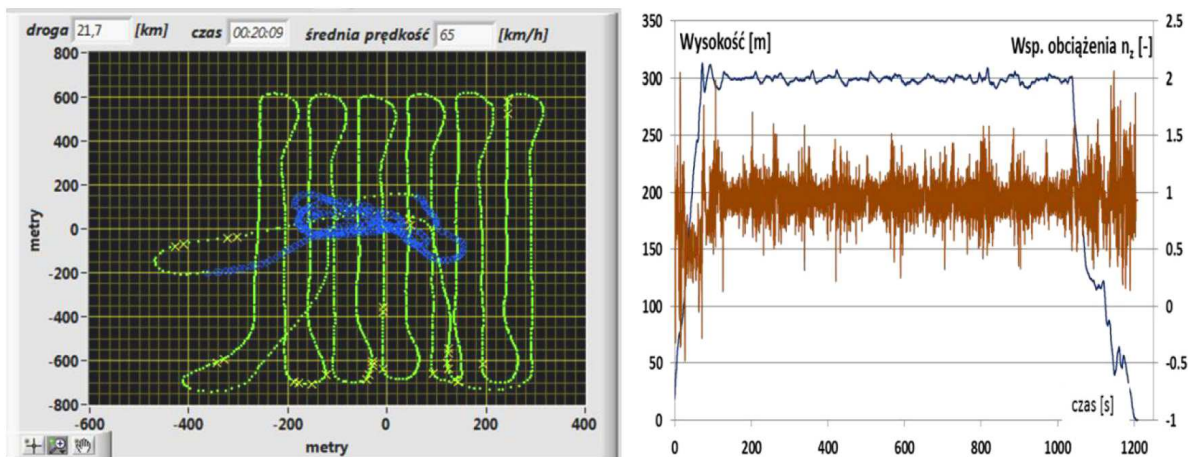
W niniejszym rozdziale przedstawiono etapy przetwarzania sygnału wejściowego. Wykorzystany został przy tym autorski program napisany w środowisku LabView [6].

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
currentPitch	currentRoll	dPAltitude	yDot	dRoll	heading	locationE	locationN	dPitch	gpsSpeed	AGL	GPS Status	Servo 1 (aileron)
		Target_Altitude	Y_acc	Target_Roll	GPS_heading	Position_X	Position_Y	Target_Speed		z_acc		
14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
Servo 2 (elevator)	Servo 3 (rudder)	Servo 4 (throttle)	Servo 5	Servo 6	Servo 7	Servo 8	cmd	reserve+(Step x256)	CHANGED	TMPRT	GPS_POS_E	GPS_POS_N
							Current_Command	spare_CPU_cycles		Sensor_Temp		
27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
current speed	target speed	currentAltitude	cState	corrRoll	corrPitch	GPS_POS_U	GPS_VEL_U	x_acc	compass	current Yaw	desired heading	velBodyX
	currentYaw		state of current command			GPS_Altitude				hover Offset X	hover Offset Y	
(feet/s)	(feet/s)	(feet * (-8))	()	()	()	(m)	(feet/s)	(from sensor)	(deg*10)	()	(deg)	()
40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52
dimb state	correction pitch	correction yaw dot	body pitch dot	body roll dot	body yaw dot	target heading	correction yaw	event	horizontal Offset	record type	time Increment	ISR Error Details
velBodyY	dVelBodyY	dVelBodyX	Q	P	R				zDot			
()	()	()	(rad/s *1024)	(rad/s *1024)	(rad/s *1024)	(deg)	()	()	(feet*8)	()	(ms)	()



Autopilot: Micropilot MP 2128g

Rys. 3. Lista parametrów zapisywanych w logu autopilota Micropilot MP 2128 g



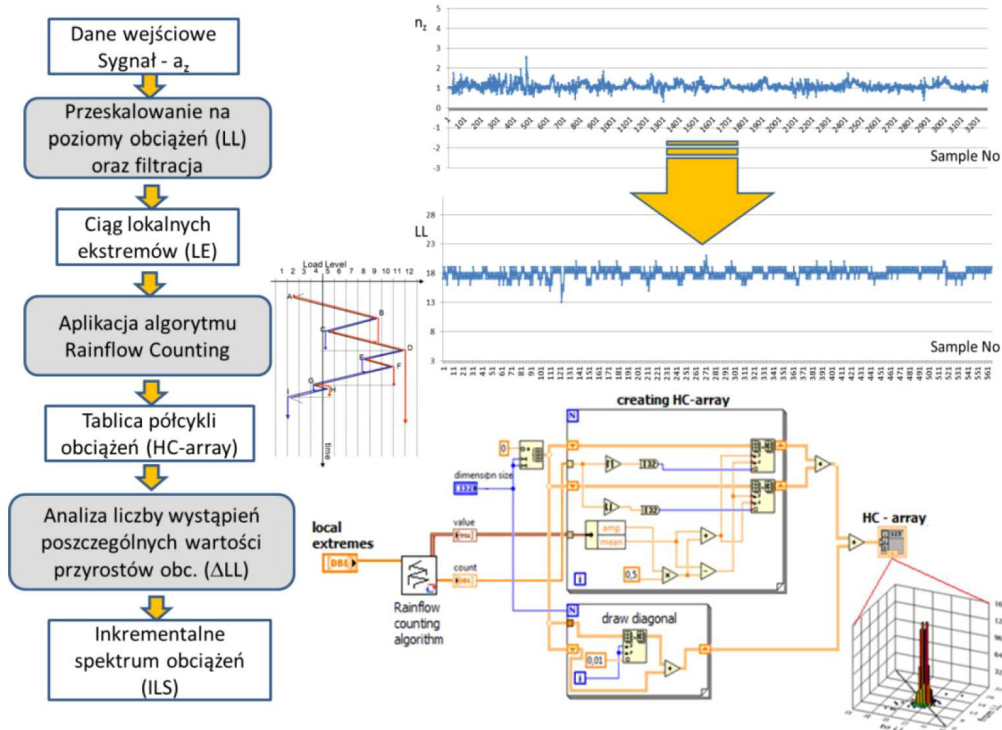
Rys. 4. Przebiegi czasowe wybranych parametrów lotu zapisane w logu autopilota

Schematu operacyjny przedstawiono na rys. 5. Najpierw współczynnik obciążenia jest konwertowany na poziom obciążenia LL zgodnie z formułą normalizacyjną opisaną wzorem (4.1) [7], następnie przebieg czasowy wartości LL jest redukowany do postaci sekwencji lokalnych ekstremów poziomów obciążenia LE

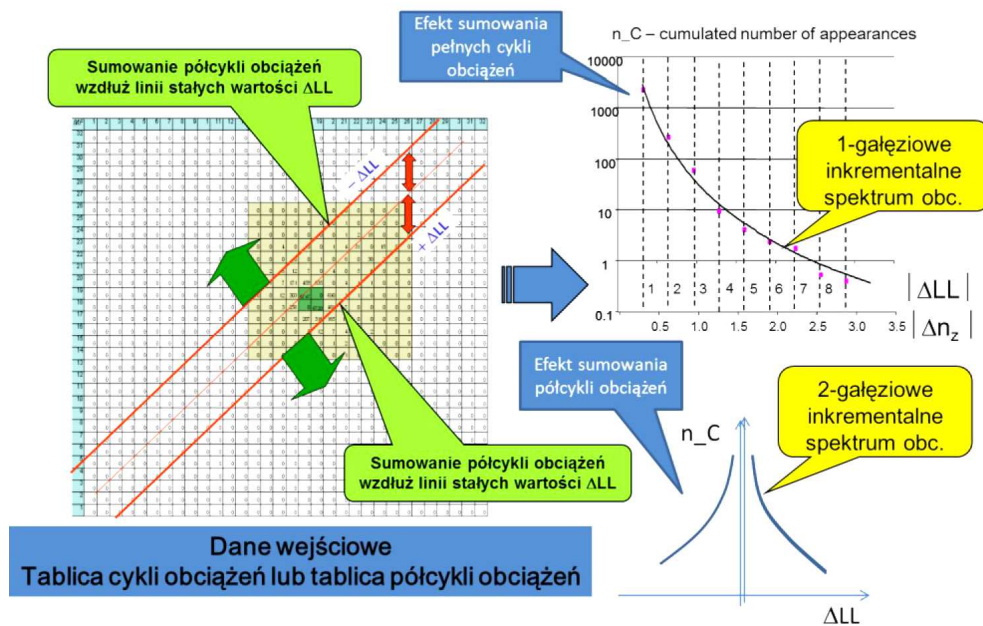
$$LL = \begin{cases} 3 & \text{dla } n_{z,max} \\ 31 & \text{dla } n_{z,min} \end{cases} \tag{4.1}$$

Przeprowadzając analizę przyrostów obciążenia występujących w sekwencji LE z zastosowaniem algorytmu Rainflow Counting, wyznaczane są tablice przejść. W zależności od algorytmu mogą to być tablice pełnych cykli obciążeń lub tablice półcykli obciążeń (czyli tablice, w których są rozróżnione dodatnie i ujemne przyrosty obciążenia) [8].

Bazując na wynikach analizy wystąpień największych i najmniejszych wartości współczynnika obciążeń w poszczególnych lotach całej sesji lotnej, do obliczeń dokonanych w kolejnych rozdziałach tej pracy przyjęto następujące wartości skrajne współczynnika obciążeń: $n_{z_max} = 5$ oraz $n_{z_min} = -3$.



Rys. 5. Ilustracja procesu wytwarzania tablic półcykli obciążeń z wykorzystaniem LabView



Rys. 6. Schemat procedury obliczeń inkrementalnych spektrów obciążeń

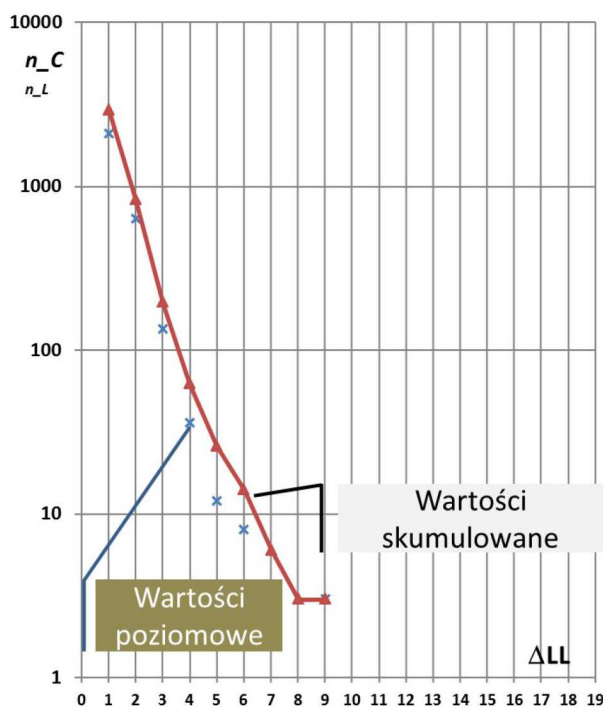
W końcowym etapie analizy określone jest inkrementalne spektrum obciążeń. Tworzy się je, sumując liczby zawarte w komórkach tablic cykli obciążeń (lub tablic półcykli obciążeń)

położonych wzdłuż linii równoległych do przekątnej zerowej i odsuniętych od nich o zadaną wartość ΔLL . Inkrementalne spektrum obciążeń reprezentuje skumulowaną liczbę wystąpień dla każdej wartości ΔLL (gdzie ΔLL jest przyrostem obciążenia). Określenie „skumulowana” wynika stąd, że liczba wystąpień dla $\Delta LL = \eta$ jest sumą poszczególnych sum wystąpień zawartych w komórkach znajdujących się na liniach reprezentujących $\Delta LL = \eta$, $\Delta LL = \eta + 1$, $\Delta LL = \eta$, $\Delta LL = \eta + 2$, itd. do końca zakresu zmienności ΔLL .

5. Określanie spektrów obciążeń reprezentatywnych dla sesji lotnej obejmującej wiele lotów

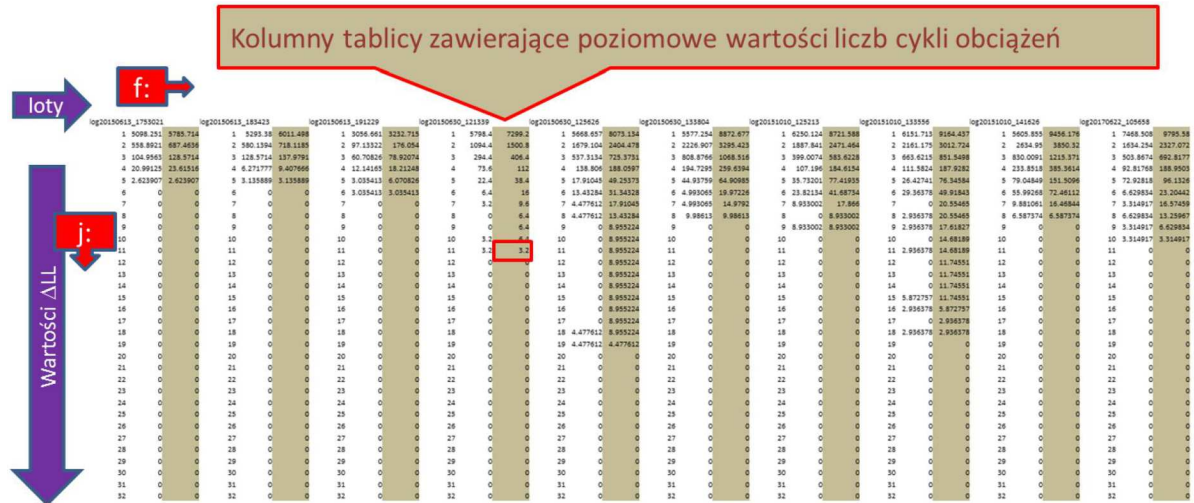
Na rys. 7 podano przykład obliczeń jednogłęziowego inkrementalnego spektrum obciążeń dla wybranego lotu X-8. W wierszu tabeli zamieszczone są kolejno: wartość ΔLL , skumulowana liczba cykli obciążeń dla danej wartości $\Delta LL (n_C)$, poziomowa liczba cykli obciążeń n_L (czyli suma wartości wszystkich komórek występujących w tablicy cykli obciążeń znajdujących się na linii reprezentującej wyłącznie daną wartość ΔLL). W kolejnych kolumnach zawarte są dane n_{1hC} oraz n_{1hL} zawierające skumulowane i poziomowe liczby cykli odniesione do 1 godziny lotu. Zakres zmienności ΔLL w kolumnie z danymi n_{1hL} wyróżniono szarym tłem. Widoczne jest, że wartości skumulowane są sumą wartości poziomowych, zaczynając od najwyższej możliwej wartości ΔLL i kończąc na aktualnie rozważanej wartości ΔLL .

Flight log:	log20151010_125213	Flight time:	0.335833	
ΔLL [-]	n_C [-]	n_L [-]	n_{1hC} [1/h]	n_{1hL} [1/h]
1	2929	2099	8721.588	6250.124
2	830	634	2471.464	1887.841
3	196	134	583.6228	399.0074
4	62	36	184.6154	107.196
5	26	12	77.41935	35.73201
6	14	8	41.68734	23.82134
7	6	3	17.866	8.933002
8	3	0	8.933002	0
9	3	3	8.933002	8.933002
10	0	0	0	0
11	0	0	0	0
12	0	0	0	0
13	0	0	0	0
14	0	0	0	0
15	0	0	0	0
16	0	0	0	0
17	0	0	0	0
18	0	0	0	0
19	0	0	0	0
20	0	0	0	0
21	0	0	0	0
22	0	0	0	0
23	0	0	0	0
24	0	0	0	0
25	0	0	0	0
26	0	0	0	0
27	0	0	0	0
28	0	0	0	0



Rys. 7. Ilustracja obliczeń koniecznych do utworzenia inkrementalnych spektrów obciążeń

Zestawione ze wszystkich lotów kolumny wartości n_{1hL} oraz n_{1hC} na poszczególnych poziomach ΔLL tworzą bazę danych wejściowych do kolejnego etapu analizy. W niniejszej pracy baza danych obejmuje 10 inkrementalnych spektrów obciążeń z lotów Skywalkera X-8. Przedstawia ją tabela na rys. 8. Szczególnie istotne są w niej wartości n_{1hL} bowiem na nich wykonywane są analizy porównawcze prowadzące do opracowania spektrów obciążeń reprezentatywnych dla sesji lotnej obejmującej wszystkie 10 lotów.



Rys. 8. Ilustracja bazy danych do opracowania spektrów obciążeń reprezentatywnych dla sesji lotnej obejmującej 10 lotów

W pierwszym etapie kreowania reprezentatywnych spektrów obciążeń tworzone jest uśrednione spektrum obciążeń ze wszystkich lotów wykonanych w ramach sesji pomiarowej. Wyznacza się je za pomocą wzorów (5.1) dla $\Delta LL = j$

$$n_{1h}L_{aggj} = \sum_{f=1}^F \frac{n_{1h}L_{j,f}}{t_T} = \sum_{f=1}^F \frac{n_{1h}L_{j,ftf}}{t_T} \tag{5.1}$$

$$n_{1h}C_{aggj} = \sum_{i=J}^j n_{1h}L_{aggj}$$

gdzie symbol J oznacza najwyższy poziom obciążenia, jaki wystąpił podczas sesji lotnej, a symbol F oznacza liczbę lotów wykonanych podczas sesji lotnej. Małymi literami oznaczono indeks poziomu obciążenia $j = 1, 2, \dots, J$ oraz indeks lotu $f = 1, 2, \dots, F$.

Korzystając ze wzorów (5.2) można wyznaczyć obwiednię widma obciążenia. Reprezentuje maksima w zestawie wartości poziomów cykli obciążenia dla danej wartości ΔLL

$$n_{1h}L_{envj} = \text{MAX}_{f=1}^F n_{1h}L_{j,f} \tag{5.2}$$

$$n_{1h}C_{envj} = \sum_{j=J}^j n_{1h}L_{envj}$$

Na rys. 9 przedstawiono efekt zastosowania wspomnianych formuł. Linie przerywane przedstawiają spektra obciążenia z każdego lotu. Czarna linia reprezentuje uśrednione spektrum obciążeń (oznaczone jako Aggregated_LS), a czerwona linia reprezentuje obwiednię LS (oznaczoną jako LS-envelope).

Kolejny krok dotyczy analizy porównawczej wartości poziomowych liczb cykli obciążenia i wyznaczenia tzw. obwiedni ważonej tablicy cykli obciążeń. Wagi są określane jako stosunek sumy czasów lotów, które partycypują w statystyce występowania niezerowej wartości poziomej liczby cykli obciążeń dla danej wartości ΔLL do całkowitej sumy czasów wszystkich lotów, r-nie (5.3). Wagi mogą przybierać wartości, licząc w dół od 1 do niewielkich wartości ułamkowych w zależności od ΔLL i zakresu obciążeń zarejestrowanych w każdym locie indywidualnym. Dla $\Delta LL = j$

$$w_j = \sum_{f=1}^F \text{sgn}(n_{1h}L_{j,f}) \frac{t_f}{t_T} \tag{5.3}$$

Obliczone wagi zostały zastosowane zarówno do utworzenia obwiedni ważonej tablicy cykli obciążeń, a także do analizy statystycznej obejmującej wartość średnie plus 1, 2 lub 3 odchylenia standardowe liczb cykli obciążeń dla poszczególnych wartości ΔLL .

Przykład analizy statystycznej dla przypadku $m + 1s$ (wartość średnia plus 1 odchylenie standardowe) dla każdego $\Delta LL = j$

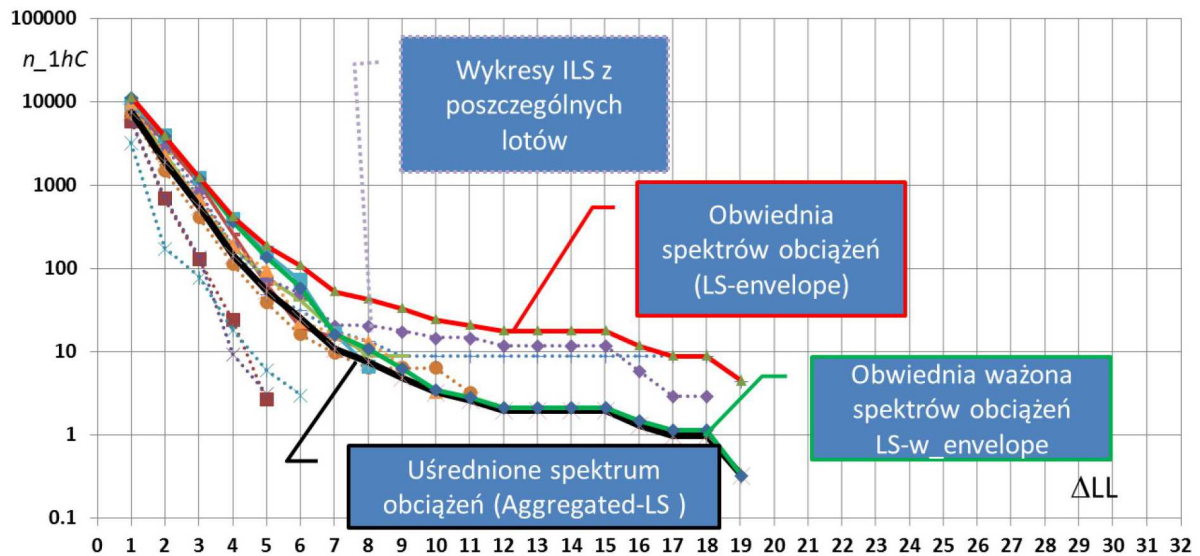
$$\begin{aligned} n_{1hL_m1s_j} &= \text{MEAN}(n_{1hL_{j,f}}) + \text{STD}(n_{1hL_{j,f}}) \\ n_{1hC_m1s_j} &= \sum_{j=J}^j n_{1hL_m1s_j} \end{aligned} \quad (5.4)$$

Uwaga: w przypadku, gdy na danym poziomie ΔLL w zbiorze inkrementalnych spektrów obciążeń występowało tylko jedno wskazanie, wówczas zamiast wartości $m + 1s$ (także zamiast $m + 2s$ i $m + 3s$) przyjmowano do obliczeń wartość tego wskazania.

Przykład obliczeń obwiedni ważonej dla $\Delta LL = j$

$$\begin{aligned} n_{1hL_wenv_j} &= \text{MAX}_{f=1}^F(n_{1hL_{j,f}})w_j \\ n_{1hC_wenv_j} &= \sum_{j=J}^j n_{1hL_wenv_j} \end{aligned} \quad (5.5)$$

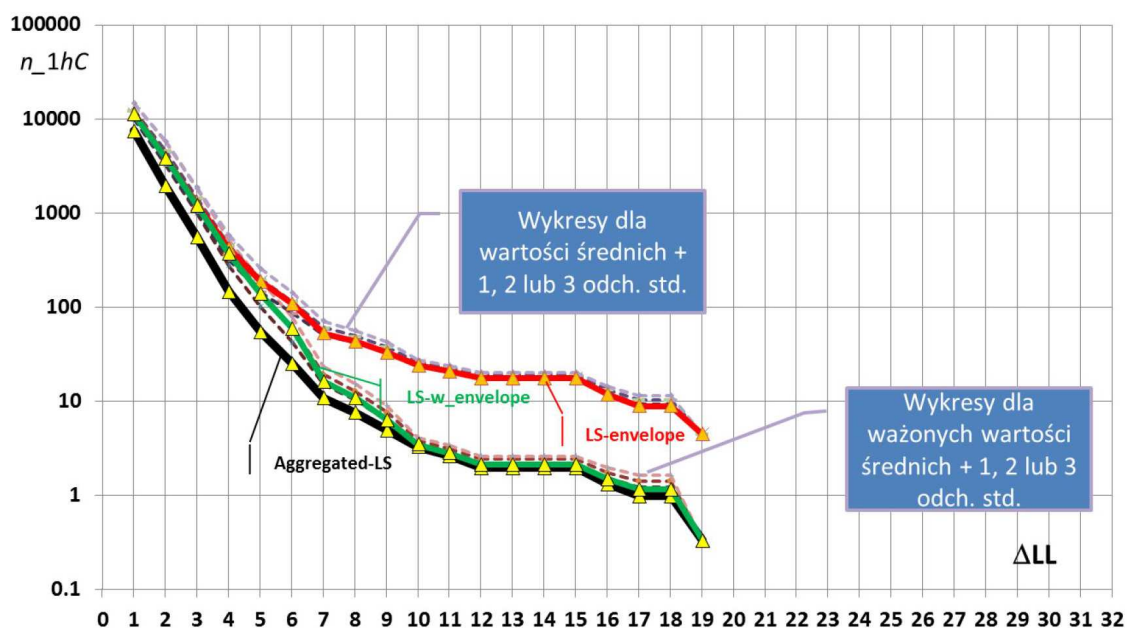
Efekt użycia wspomnianych wag został pokazany również na rys. 9. Zielona linia pokazuje obwiednię ważoną LS (oznaczoną jako $LS_w_envelope$). Widoczne jest, że zielona linia dla małych wartości ΔLL pokrywa się ze zwykłą obwiednią spektrów obciążeń, a dla dużych wartości ΔLL leży nieco powyżej uśrednionego spektrum obciążeń.



Rys. 9. Inkrementalne spektra obciążeń dla sesji lotnych

Analogicznie do procedury opisanej wzorami (5.5) zastosowano wagi do wyników obliczeń statystycznych. Na rys. 10 przedstawiono wykres zawierający linie LS -envelope oraz $Aggregated$ - LS pokazane na tle linii reprezentujących wartości bez wag oraz wartości ważne odnoszące się do liczby cykli obciążeń obliczonych dla każdego ΔLL jako średnia plus 1-, 2- lub 3-odchylenia standardowe. Pozycja każdej linii względem innych wskazuje, które ze spektrów obciążeń reprezentatywnych dla całej sesji lotnej jest bardziej konserwatywne (tj. które zawiera więcej cykli obciążenia dla danej wartości ΔLL).

Jeżeli liczby cykli obciążeń dla poszczególnych wartościach ΔLL miałyby rozkład normalny, a liczba analizowanych lotów wykonanych w ramach sesji pomiarowej byłaby odpowiednio duża,



Rys. 10. Porównanie inkrementalnych spektrów obciążeń reprezentatywnych dla sesji lotnej

aby móc przeprowadzić wnioskowanie statystyczne, wówczas uśrednione spektrum obciążeń reprezentowałoby prawdopodobieństwo równe ok. 0,5 (chodzi o prawdopodobieństwo, że w jakimś locie liczba cykli obciążeń dla danej wartości ΔLL mogłaby być większa niż w uśrednionym spektrum obciążeń z sesji pomiarowej). Takie spektrum obciążeń wydaje się być niekonserwatywne, gdyż owe prawdopodobieństwo jest takie, jak przy rzucie monetą.

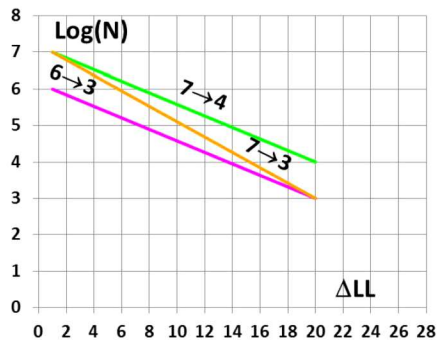
Z kolei w odniesieniu do obwiedni spektrów obciążeń zaznaczonej czerwoną linią, która leży powyżej wartości linii dla średniej plus 2 odchylenia standardowe, prawdopodobieństwo tego rodzaju zdarzenia byłoby bardzo małe (poniżej 0,05). Zatem można stwierdzić, że obwiednia spektrów obciążeń reprezentuje najbardziej konserwatywne spektrum obciążeń.

Obwiednia ważona LS reprezentuje quasikonserwatywne LS , gdyż dla małych wartości ΔLL (które zdarzają się najczęściej) obwiednia ważona zrównuje się z obwiednią zwykłą, a dla dużych wartości ΔLL (które zdarzają się rzadko) obwiednia ważona zrównuje się z uśrednionym spektrum obciążeń.

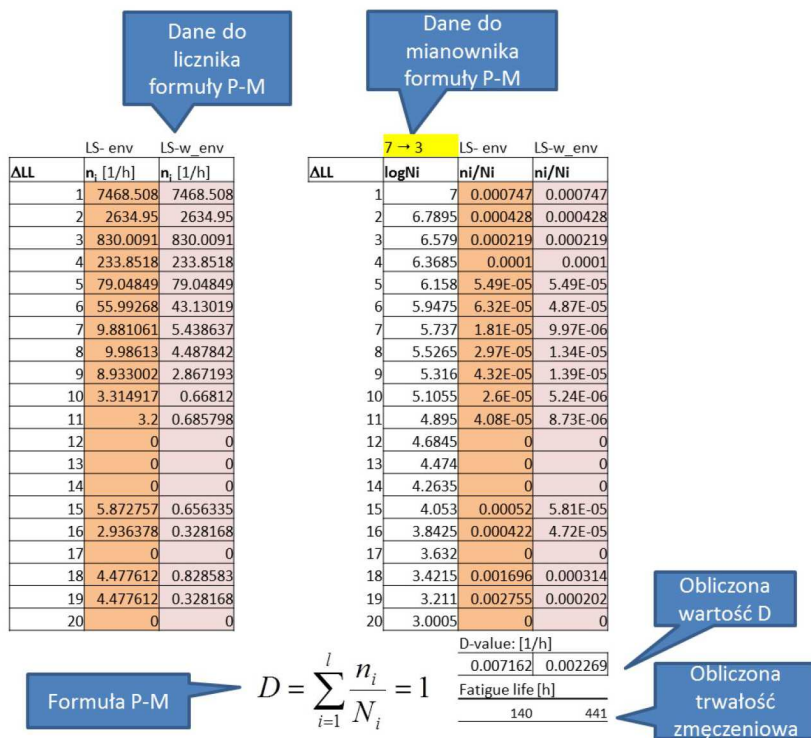
6. Spektrum obciążeń a trwałość zmęczeniowa

Stopień konserwatyzmu spektrum obciążeń przekłada się na wynik estymacji trwałości zmęczeniowej. Przyjęcie do obliczeń konserwatywnego spektrum obciążeń oznacza, że obliczona trwałość zmęczeniowa będzie niedoszacowana. Jeśli rezultat takich obliczeń będzie potraktowany jako wskazanie jak długo można bezpiecznie eksploatować daną strukturę samolotu, to oznacza zadziałanie w stronę podniesienia zapasu bezpieczeństwa (kosztem wcześniejszego wycofania samolotu z eksploatacji). Z kolei użycie niekonserwatywnego spektrum obciążeń do takich obliczeń dałoby rezultat, który godziłby w bezpieczeństwo. Poczynione tu porównanie jest jedynie porównaniem jakościowym. W celu ilościowego porównania przeprowadzone zostały uproszczone obliczenia zmęczeniowe. W obliczeniach posłużono się hipotezą Palmgrena Minera w klasycznej formie. Założono, że opisane wyżej konserwatywne lub quasi-konserwatywne spektra obciążeń samolotu Skywalker X-8 będą z osobna oddziaływać na krytyczny element struktury nośnej o właściwościach zmęczeniowych zdefiniowanych w postaci krzywej S-N (napężenie – liczba cy-

kli do zniszczenia) przetransformowanej do postaci funkcji liniowej $\log N(\Delta LL)$. Rozpatrzono 3 warianty przebiegów krzywej S-N, które pokazano na rys. 11.



Rys. 11. Trzy warianty krzywej S-N przyjętej do obliczeń zmęczenia



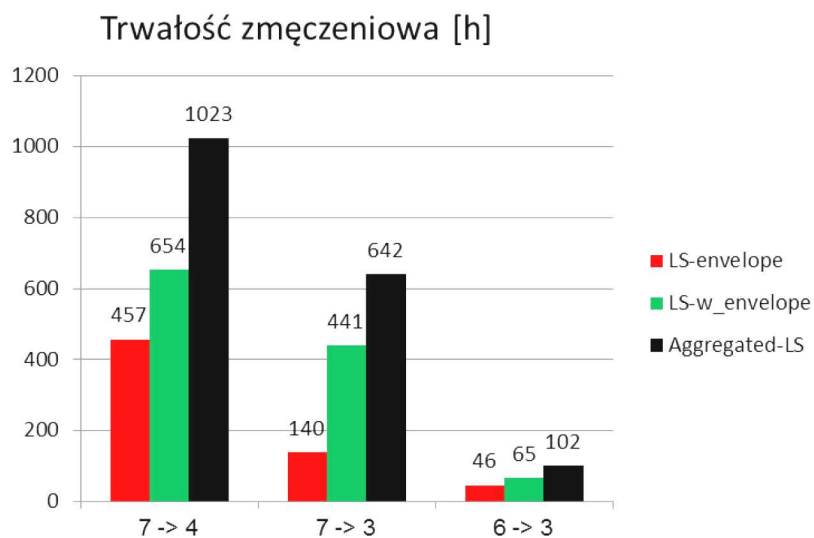
Rys. 12. Przykład obliczeń dotyczących porównania efektu zmęzeniowego dla dwóch spektrów obciążeń oddziaływujących na ten sam element o zadanej charakterystyce zmęzeniowej $\log N(\Delta LL)$

Obliczenia przeprowadzono w Excelu zgodnie z przykładem podanym na rys. 12.

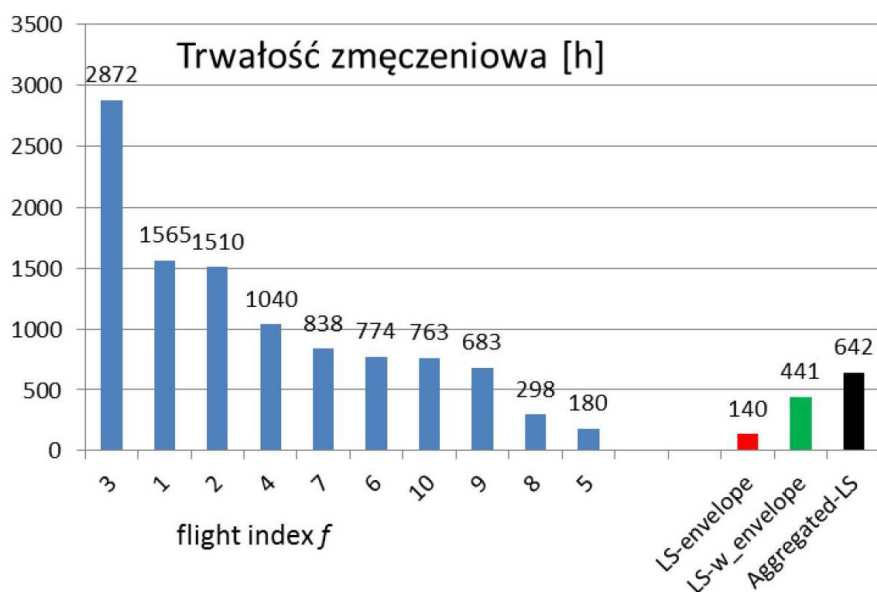
Wyniki obliczeń przedstawiono na wykresie zamieszczonym na rys. 13.

Zamieszczone na tym wykresie rezultaty ukazują, że dla obwiedni spektrów obciążeń obliczona trwałość jest od 2,2 do 4.6 razy niższa niż dla uśrednionego spektrum obciążeń (zależnie od charakterystyki zmęzeniowej materiału). Wyniki dla ważonej obwiedni obciążeń układają się w przybliżeniu w połowie pomiędzy tamtymi wynikami.

Aby szerzej wyjaśnić aspekt konserwatywności przeanalizowanych wyżej spektrów obciążeń sporządzony został jeszcze jeden wykres, na którym porównano wyniki reprezentatywnych spektrów dla sesji lotnej z rezultatami obliczeń trwałości zmęzeniowej dla spektrów obciążeń z poszczególnych lotów tej sesji (rys. 14). Do obliczeń użyto środkowej charakterystyki S-N (w której liczba cykli do zniszczenia zmienia się w zakresie od 10^7 dla $\Delta LL = 1$ do 10^3 dla $\Delta LL = 20$).



Rys. 13. Różnice trwałości zmęczeniowej obliczone dla reprezentatywnych spektrów obciążeń z sesji lotnej i 3 charakterystyk zmęczeniowych badanego elementu (przedstawionych na rys. 11)



Rys. 14. Porównanie wyników obliczeń trwałości zmęczeniowej dla spektrów obciążeń z poszczególnych lotów i trzech spektrów obciążeń reprezentatywnych dla sesji lotnej

Z wykresu na rys. 14 wynika, że każde z opisanych powyżej reprezentatywnych spektrów obciążeń jest bardziej konserwatywne niż spektra z większości wykonanych lotów, gdyż generuje mniejsze trwałości zmęczeniowe. Znajdujemy tu potwierdzenie, że obwiednia spektrów obciążeń jest najbardziej konserwatywną formą reprezentatywnego spektrum obciążeń, gdyż generuje trwałość zmęczeniową najniższą ze wszystkich przedstawionych na tym wykresie. Jednocześnie widoczne jest, że uśrednione spektrum obciążeń jest również w znacznym stopniu konserwatywne, gdyż w zbiorze spektrów obciążeń z poszczególnych lotów tylko w dwóch przypadkach otrzymano niższą trwałość zmęczeniową. Jednak gdyby zrobić to porównanie z 30% tolerancją dokładności, to wówczas aż 7 wyników z poszczególnych lotów plasowałoby się w zakresie obliczonej trwałości zmęczeniowej dla uśrednionego spektrum obciążeń. Analogiczne porównanie dla przypadku obwiedni ważonej spektrów obciążeń wypada znacznie korzystniej pod tym względem.

7. Podsumowanie i wnioski

W artykule opisano metody opracowania konserwatywnych spektrów obciążeń na podstawie zarejestrowanego przyspieszenia podczas sesji lotnej obejmującej wiele lotów przeprowadzonych według powtarzalnego scenariusza. Wykazano, że obwiednia zwykła i obwiednia ważona spektrów obciążeń (uzyskane w wyniku analiz porównawczych na zbiorze spektrów obciążeń z wszystkich lotów sesji pomiarowej) generują znacząco niższe wyniki szacowania trwałości zmęczeniowej niż wynik uzyskany z użycia uśrednionego spektrum obciążeń. Użycie obu wyżej wymienionych obwiedni spektrów obciążeń do szacowania okresu bezpiecznej eksploatacji struktury płatowca BSL pozwala określić dolną (pesymistyczną) oraz górną (optymistyczną) granicę tzw. rezerwu tej struktury. Określenie obydwu granic wymaga zgromadzenia znacznie szerszej bazy danych, tak aby możliwe stało się obliczenie prawdopodobieństwa wystąpienia zużycia zmęczeniowego dla obydwu rodzajów reprezentatywnego spektrum obciążeń.

Bibliografia

1. CHATURVEDI S.K., SEKHAR R., BANERJEE S., KAMAL H., Comparative review study of military and civilian unmanned aerial vehicles (UAVs), *INCAS Bulletin*, **11**, 3, 181-182, 2019
2. RADOGLOU-GRAMMATIKIS P., SARIGIANNIDIS P., LAGKAS T., MOSCHOLIOS I., A compilation of UAV applications for precision agriculture, *Computer Networks*, **172**, 2020
3. MOHSAN S.A.H., OTHMAN N.Q.H., LI Y., ALSHARIF M.H., KHAN M.A., Unmanned aerial vehicles (UAVs): practical aspects, applications, open challenges, security issues, and future trends, *Intell Serv Robotics*, **16**, 1, 109-137, 2023
4. AL-DOSARI K., HUNAITI Z., BALACHANDRAN W., Systematic review on civilian drones in safety and security applications, *Drones*, **7**, 210, 2023, <https://doi.org/10.3390/drones7030210>
5. GOETZENDORF-GRABOWSKI T., TARNOWSKI A., FIGAT M. *et al.*, Lightweight unmanned aerial vehicle for emergency medical service – Synthesis of the layout, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part G-Journal of Aerospace Engineering*, **235**, 1, 5-21, 2021
6. GŁOWACKI D., Rozprawa doktorska p.t. *Badanie spektrów obciążeń samolotu bezałogowego sterowanego autopilotem*, Oficyna Wydawnicza PW, 2013
7. KOSSIRA H., REINKE W., *Entwicklung eines Belastungskollektivs für leichte Motorflugzeuge aus den Beanspruchungsmessungen an einem Segelflugzeug*, IFL-IB 86-04, TU Braunschweig, 1986
8. RODZEWICZ M., GŁOWACKI D., HAJDUK J., Comparative analysis of the load spectra recorded during photogrammetric missions of lightweight UAVs in tailless and conventional configurations, *Fatigue of Aircraft Structures*, **2022**, 14, 114-134, 2022

Studies of load spectra of unmanned aircraft in photogrammetric missions

The article presents the results of research on the load spectrum of lightweight unmanned aerial vehicles during photogrammetric missions. The data for analysis were obtained from the time series of accelerations recorded in autopilot logs. Original software developed in the LabView environment was used for this purpose. A key component of this software is a module implementing the Rainflow Counting algorithm. The results include load cycle tables and incremental load spectra, containing statistics of load increments of various sizes. Detailed analyses of incremental load spectra from all flights were conducted to determine the frequency statistics of different load increments. Based on this, representative load spectra were developed for the entire flight session, encompassing all flights, with varying levels of conservatism in relation to the fatigue life estimation. The results of fatigue life calculations for the developed load spectra were demonstrated using the assumed material fatigue characteristics.