

Projekt 10 – Obciążenia kadłuba

W obliczeniach obciążeń zewnętrznych kadłub samolotu traktuje się zazwyczaj jako belkę podpartą na okuciach skrzydło-kadłub. Do źródeł obciążeń kadłuba należy zaliczyć:

- reakcje innych części samolotu mocowanych do kadłuba, przede wszystkim usterzenia i podwozia oraz reakcje mas skupionych, ładunku i urządzeń,
- obciążenia aerodynamiczne pochodzące od rozkładu ciśnienia,
- masę własną kadłuba w polu przyspieszeń,
- różnicę ciśnień wewnątrz kabiny i na zewnątrz - dotyczy to kabin ciśnieniowych,
- zabudowane na kadłubie jednostki napędowe i inne instalacje siłowe.

Niniejszego projekt nie obejmuje wyznaczenia wszystkich obciążeń, ogranicza się do uwzględnienia sił „masowych” oraz obciążeń od usterzenia poziomego i zespołu napędowego.

Zespół napędowy

Wyznaczenie obciążeń od zespołu napędowego polega na zdefiniowaniu przypadków wymiarujących, czyli maksymalnych dla każdego rodzaju obciążenia. Obciążenia te mają dla konstrukcji znaczenie lokalne. Wpływają na obciążenie zabudowy silników (łoża silnikowe, pylony, itp.) i przyległej części konstrukcji. Zasadniczo na obciążenia te składają się:

- a) ciąg silnika,
- b) moment obrotowy,
- c) moment żyroskopowy pochodzący od wirujących części silnika (śmigło, turbiny, sprężarki, itp.),
- d) siły masowe.

Ad. a) – ciąg silnika (maksymalną wartość) otrzymujemy bezpośrednio z charakterystyk zespołu napędowego w przypadku silników odrzutowych. Dla określenia ciągu silników tłokowych i turbośmigłowych korzystamy z zależności:

$$F = \frac{\eta N}{V} \quad (10.1)$$

gdzie:

- η - sprawność śmigła,
- N – moc silnika [W],
- V – prędkość lotu [m/s]
- F – ciąg zespołu silnik śmigło [N].

Należy zwrócić uwagę, że maksimum ciągu zespołu silnik śmigło nie musi pokrywać się z maksimum mocy samego silnika.

Ad. b) – maksymalny moment obrotowy silnika tłokowego lub turbośmigłowego jest większy od momentu średniego obliczonego ze znanej mocy i obrotów. Ta nadwyżka momentu wynika z możliwych nierównomierności pracy silnika. Dla silników tłokowych zależy głównie od ilości cylindrów. Dla silników turboodrzutowych moment obrotowy będzie wynikiem maksymalnych przyspieszeń kątowych mas wirujących silnika. Należy, zatem przyjąć do obliczeń współczynnik k równy stosunkowi momentu maksymalnego M_{OBR_max} do momentu obrotowego średniego M_{OBR_sr} właściwy dla zabudowanego silnika.

$$k = \frac{M_{\text{OBR}_{\text{max}}}}{M_{\text{OBR}_{\text{sr}}}} \quad (10.2)$$

Współczynnik k należy określić bądź z danych silnika, bądź w braku takich posłużyć się aktualnymi zaleceniami przepisów budowy. Tak, więc ostatecznie dla silnika ze śmigłem:

$$M_{\text{OBR}_{\text{max}}} = k \frac{N}{\omega_s} \quad (10.3)$$

gdzie:

ω_s – prędkość kątowna śmigła [1/s].

Dla silników turboodrzutowych maksymalny moment obrotowy będzie wynosił

$$M_{\text{OBR}_{\text{max}}} = J_{\text{OS}} \varepsilon_s k \quad (10.4)$$

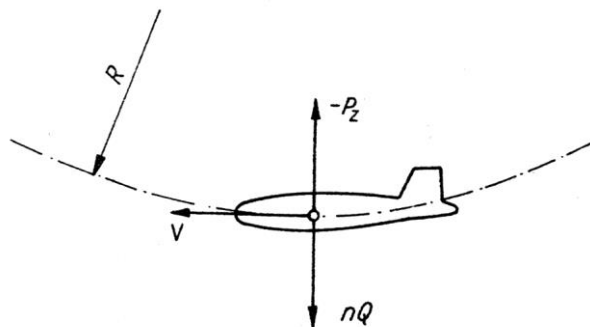
gdzie:

J_{OS} - moment bezwładności mas obrotowych silnika,

ε_s - maksymalne przyspieszenie kątowe, zwiększające prędkość kątową mas obrotowych (z danych silnika),

k - współczynnik ($k > 1$) dla uwzględnienia możliwych wzrostów wartości ε_s .

Ad. c) - momenty żyroskopowe będą zależały od biegunowego momentu bezwładności obracających się mas J_O , prędkości kątowej tych mas i prostopadłej do niej prędkości kątowej samolotu ω_y lub ω_z w ruchu obrotowym wokół osi y lub z . Określenie prędkości kątowych ω_y lub ω_z dokonuje się w oparciu o przepisy (np. JAR-23.371). Przepisy zwykle definiują konkretne wartości prędkości kątowych i nakazują sprawdzenie maksymalnych możliwych do osiągnięcia wartości. Do wyznaczenia prędkości ω_y można się posłużyć analizą ruchu krzywoliniowego samolotu.



Rys. 10.1 – Symetryczny ruch krzywoliniowy samolotu
(W. Błażewicz – Budowa samolotów, Warszawa 1979)

Z zależności na rysunku:

$$nQ = mg + m\omega_y^2 R \quad (10.5)$$

skąd:

$$n - 1 = \frac{\omega_y^2 R}{g} \quad (10.6)$$

wiedząc, że:

$$V = \omega_y R \quad (10.7)$$

otrzymamy:

$$\omega_y = \frac{g(n-1)}{V} \quad (10.8)$$

Moment żyroskopowy wyznaczamy ze wzoru:

$$M_{GYR} = J_O \Omega \omega_y \quad (10.9)$$

gdzie:

Ω - prędkość kątowna elementów wirujących (śmigła, turbiny, itp.).

J_O - moment bezwładności elementów wirujących (w przypadku braku danych, należy oszacować masę śmigła lub elementów wirujących silnika turbinowego; moment bezwładności obliczamy traktując łopatę śmigła jako pręt jednorodny a wirnik turbiny jako walec jednorodny).

Podany schemat obliczeń powtarzamy dla przypadku prędkości kątowej odchylenia - ω_Z

Uwaga: należy zwrócić szczególną uwagę na dobre wyznaczenie prędkości kątowych, tzn. znalezienie takiego przypadku na obwiedni obciążeń, który odpowiada największemu obciążeniu.

Ad. d) - siły masowe wymagają wyznaczenia właściwych wartości współczynnika obciążenia na poszczególne osie. O ile wyznaczenie n_z nie jest kłopotliwe - odczytujemy wprost z obwiedni obciążeń, o tyle pozostałe wartości (n_x i n_y) określamy bezpośrednio z przepisów lub z analizy przypadków wymiarujących.

Siły masowe obliczamy ze wzorów:

$$F_X = n_X Q_S, \quad F_Y = n_Y Q_S, \quad F_Z = n_Z Q_S \quad (10.10)$$

gdzie:

Q_S - ciężar zespołu napędowego.

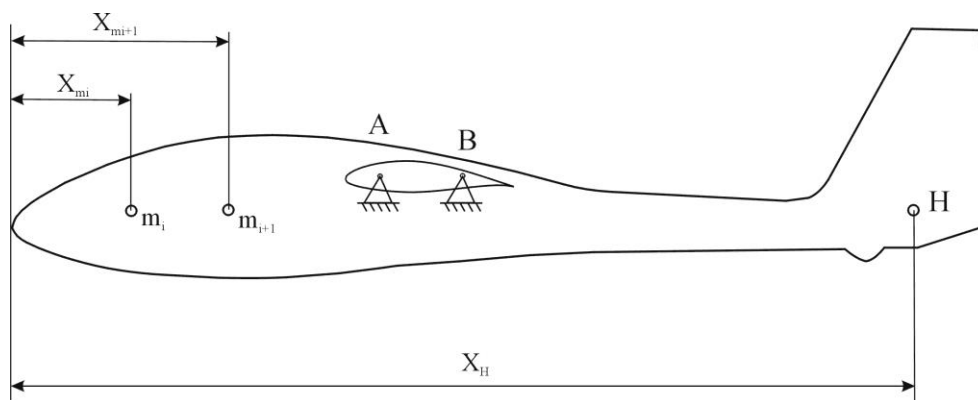
Przedstawienie końcowych obliczeń - finalne wyniki obliczeń należy przedstawić w tabeli (patrz przykład)

Samolot rolniczy - obciążenie układu napędowego - przykład

Obciążenie	Wartość wymiarująca	Przypadek wymiarujący
F_X	20000 [N]	Ciąg startowy
F_Y	10000 [N]	Siła masowa - zakręt przy V_a
F_Z	15000 [N]	Siła masowa - punkt D obwiedni
M_X	55000 [Nm]	Max moment obrotowy
M_Y	2500 [Nm]	Moment żyroskopowy w p.A
M_Z	2500 [Nm]	Moment żyroskopowy q p.A

Obciążenia ogólne (zewnętrzne) kadłuba

W celu wyznaczenia obciążeń zewnętrznych kadłuba, przyjmujemy schemat belki podpartej na okuciach głównych skrzydeł (Rys. 10.2)



Rys.10.2 – Schemat przyjęty do analizy obciążeń kadłuba

Przyjmujemy w analizie trzy przypadki obciążenia zespołami „sił jednostkowych”:

- pochodzącymi od masy kadłuba poddanego przyspieszeniu odpowiadającemu współczynnikowi obciążeń $n = 1$,
- pochodzącymi od mas kadłuba poddanego przyspieszeniom odpowiadającym założonemu przyspieszeniu kątowemu ε_0 wokół środka masy, czyli poddanych działaniu współczynników obciążeń

$$n_\varepsilon = \frac{\varepsilon_0 x_i}{g}$$

(na ogół przyspieszenieątowe wygodniej jest wymiarować pośrednio przez określenie P_{ZH0} , czyli siły wywołującej przyspieszenieątowe, lecz przyłożonej na usterzeniu),

- aerodynamiczną P_{ZH} działającą na usterzeniu poziomym.

W każdym przypadku belka kadłuba jest stanie równowagi pod działaniem sił obciążających i reakcji na okuciach skrzydłowych. Dla podanych przypadków obciążeń należy sporządzić wykresy sił tnących i momentów gnących. Wartość siły tnącej i momentu gnącego dla dowolnego przekroju A-A można wyznaczyć z zależności:

$$Q_{A-A} = Q_{Anj} \frac{n}{n_j} + Q_{Aej} \frac{P_{zH\varepsilon}}{P_{zHej}} + Q_{AHj} \frac{P_{zH}}{P_{zHj}} \quad (10.11)$$

$$M_{A-A} = M_{Anj} \frac{n}{n_j} + M_{Aej} \frac{P_{zH\varepsilon}}{P_{zHej}} + M_{AHj} \frac{P_{zH}}{P_{zHj}} \quad (10.12)$$

gdzie:

- Q_{A-A} i M_{A-A} - siła tnąca i moment gnący dla założonego przypadku obciążeń w przekroju A-A,
- Q_{Anj} , Q_{Aej} , Q_{AHj} - rzędne wykresu siły tnącej dla odpowiednich przypadków obciążeń jednostkowych w przekroju A-A,
- M_{Anj} , M_{Aej} , M_{AHj} - rzędne wykresu momentów gnących jak poprzednio,
- n , $P_{zH\varepsilon}$, P_{zH} - wielkość obciążeń dla badanego przypadku obciążeń,
- n_j , P_{zHej} , P_{zHj} - jednostkowe wielkości obciążeń dla badanego przypadku.

Schemat obliczeń dla obciążeń jednostkowych:

- a) należy przygotować w postaci tabelarycznej zestawienie mas mających wpływ na obciążenie kadłuba; zestawienie to powinno być wykonane w oparciu o analizę masową przeprowadzoną w [Projekcie 3 - Osiągi i analiza masowa](#). Jeżeli analiza masy kadłuba (struktury) została zrobiona zbyt zgrubnie, należy dokonać jej uszczegółowienia. Wyznaczyć środek ciężkości kadłuba (x_{SC_k}) oraz moment bezwładności kadłuba (J_{yy_k}) z zależności:

$$x_{SC_k} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i x_i}{\sum_{i=1}^n m_i}, \quad J_{yy_k} = \left(\sum_{i=1}^n m_i x_i^2 - x_{SC_k}^2 \sum_{i=1}^n m_i \right) \quad (10.13)$$

- b) dla $n=1$ wyznaczyć reakcje w podporach A i B, spełniające warunki równowagi sił i momentów sił:

$$\sum_{i=1}^n P_i + R_A + R_B = 0 \quad (10.14)$$

$$\sum_{i=1}^n P_i x_{mi} + R_A x_A + R_B x_B = 0 \quad (10.15)$$

gdzie:

$$P_i = m_i g \quad (10.16)$$

Uwaga: równania (10.13-10.14) są słuszne przy założeniu zgodnego zwrotu sił P_i i reakcji R_A i R_B – reakcje będą zatem dodatnie, gdy przyjmiemy, że siły ciężkości są ujemne.

- c) wykonać wykresy sił tnących i momentów gnących dla w/w przypadku ($n=1$),
 d) przyjmując jednostkową siłę na usterzeniu poziomym $P_{ZH}=1\text{kN}$ obliczyć przyspieszenie kątowe z wzoru:

$$\varepsilon = \frac{-P_{ZH} l_H}{J_{yy}} \quad (10.17)$$

gdzie:

l_H – ramię usterzenia poziomego ($x_H - x_{SC}$), gdzie x_{SC} jest położeniem środka ciężkości samolotu,

J_{yy} – moment bezwładności względem osi poprzecznej (prostopadłej do płaszczyzny symetrii samolotu, przechodzącej przez środek ciężkości samolotu).

- e) wyznaczyć siły masowe od poszczególnych elementów z zależności:

$$P_{i\varepsilon} = m_i \varepsilon (x_i - x_{SC_k}) \quad (10.18)$$

- f) wyznaczyć reakcje w podporach A i B; można to zrobić korzystając z równań (10.14-10.15) lub wprost ze wzoru:

$$R_A = -R_B = \frac{\varepsilon J_{yy_k}}{x_B - x_A} \quad (10.19)$$

- g) wykonać wykresy sił tnących i momentów gnących dla w/w przypadku (obciążenie od przyspieszenia kąowego wg 10.17),

- h) wyznaczyć reakcje w podporach A i B dla przypadku obciążenia jednostkową siłą na usterzeniu poziomym $P_{ZH}=1\text{kN}$, z zależności:

$$R_B = \frac{P_{ZH}(x_A - x_H)}{x_B - x_A} \quad , \quad R_A = -P_{ZH} - R_B \quad (10.20)$$

- i) wykonać wykresy sił tnących i momentów gnących dla w/w przypadku ($P_{ZH}=1\text{kN}$).

Dalsza analiza obciążenia kadłuba wymaga określenia wymiarujących wartości współczynnika obciążenia (n) oraz wartości przyspieszenia kąowego i siły na usterzeniu poziomym. Wartości te należy wyznaczyć zgodnie z wytycznymi podanymi w przepisach budowy samolotów. Następnie całkowite obciążenie należy wyznaczyć stosując zależności (10.11-10.12). Wynikiem końcowym powinny być sumaryczne wykresy sił tnących i momentów gnących oraz wartości reakcji w okuciach głównych.

Spis literatury

1. W. Błażewicz; "Budowa samolotów - obciążenia", Wydawnictwa PW, Warszawa 1976
2. M. Skowron "Budowa samolotów - obciążenia - zbiór zadań", Wydawnictwa PW, Warszawa 1979
3. St. Danilecki „Konstruowanie samolotów”, Oficyna wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2004
4. W. Stafiej "Obliczenia stosowane przy projektowaniu szybowców", PW 2000
5. R. Cymerkiewicz „Budowa samolotów”, WKiŁ, Warszawa 1982