

KONCEPCJE ROZWIĄZAŃ WIBRACYJNYCH URZĄDZEŃ MANEWROWYCH DO STEROWANIA LOTEM BEZZAŁOGOWYCH MODELI LATAJĄCYCH TYPU MAV

PAWEŁ OSTAPKOWICZ

Politechnika Białostocka

Streszczenie

W artykule przedstawiono koncepcje i rozwiązanie projektowe układów wibracyjnych turbulizatorów do generowania zaburzeń warstwy przyściennej na skrzydłach bezzałogowych modeli latających typu MAV. Pod uwagę brano układy typu makro, z elementami roboczymi w postaci wibrujących kłap i membran. Jako źródła napędu zastosowano serwomechanizmy modelarskie i piezogeneratory. Opracowanie projektowe poprzedzono prezentacją kilkunastu koncepcji wstępnych takich układów, z omówieniem przyjętych założeń funkcjonalnych i konstrukcyjnych, analizą konstrukcji i podstawowymi obliczeniami kinematycznymi.

WSTĘP

Z informacji zawartych w pracach [3, 4, 5] wynika, że zastosowanie w przypadku bezzałogowych modeli latających typu MAV (ang. micro air vehicles) układów z aktywnymi turbulizatorami – jako generatorów zaburzeń przepływu nad skrzydłem w postaci mikro-wirów, stwarza możliwość sterowania i regulacji wartości siły nośnej skrzydeł.

Celem zastosowania takich układów miałyby być polepszenie stateczności i możliwość sterowania lotem modelu, z uzyskaniem poprawy manewrowości, względem obecnie stosowanych rozwiązań z klasycznymi sterami.

Pod uwagę brane są dwa warianty rozwiązań takich układów: w pierwszym – jako elementów wspomagających klasyczne układy ze sterami, w drugim – jako całkowicie autonomicznych urządzeń manewrowych, zastępujących klasyczne układy ze sterami.

Warto zauważyć, że usytuowanie aktywnych turbulizatorów na krawędziach natarcia skrzydeł skraca stałe czasowe modelu, co pozwala na polepszenie jego charakterystyk dynamicznych.

Według informacji odnajdywanych w literaturze są to urządzenia o bardzo zróżnicowanej konstrukcji i rodzaju energii wykorzystywanej przez elementy robocze układu, do wygenerowania zaburzeń w postaci mikro-wirów.

Jednym z rozwiązań jest zastosowanie jako elementów roboczych turbulizatorów wibrujących kłap lub membran. Mogą to być elementy typu mikro – oparte o technologie MEMS lub typu makro – oparte o zastosowanie zewnętrznych wydzielonych źródeł napędu.

W niniejszym artykule przedstawiono koncepcje rozwiązań konstrukcyjnych układów z aktywnymi turbulizatorami, z elementami roboczymi typu makro w postaci wibrujących klap i membran. Jako źródła napędu elementów roboczych zastosowano typowe serwomechanizmy modelarskie i piezo-generatory.

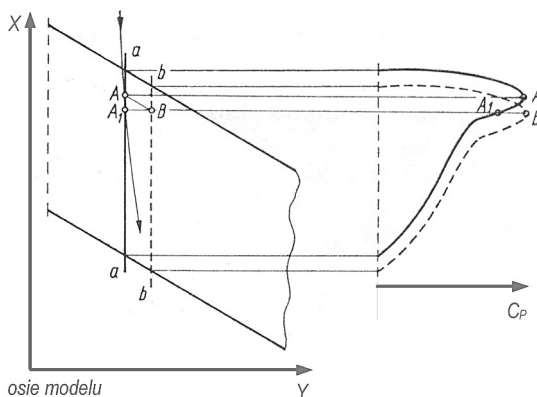
Opracowując konstrukcje układów, przyjęto bazowy model mikro-samolotu, o masie około 1 kg, latający z prędkościami do 100 km/h, o konstrukcji skrzydła typu delta. Do implementacji proponowanych rozwiązań układów wybrano istniejącą modelarską konstrukcję latającego skrzydła w układzie delta Bullit 02039, czeskiej firmy Topmodel CZ.

2. TESTOWE SKRZYDŁO TYPU DELTA

2.1. Charakterystyka ogólna skrzydła typu delta

Skrzydła w układzie delta mają kraweźdź natarcia cofającą się ku tyłowi i są stosowane zwykle w samolotach nie mających ogonowego usterzenia poziomego. Znajdują one częste zastosowanie w konstrukcji samolotów, które latają z prędkościami bliskimi prędkości dźwięku lub przekraczają ją.

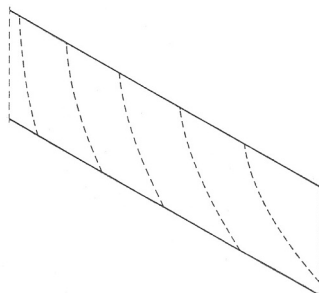
W modelarstwie zastosowanie skrzydeł delta ma natomiast inny cel. Przy skróceniu końców takiego płata na mniejsze kąty natarcia uzyskuje się znacznie korzystniejsze charakterystyki pod względem stateczności podłużnej. Stąd znajdują one zastosowanie, szczególnie w konstrukcjach bezogonowych, dla których samo skrzydło musi zapewniać wystarczającą stateczność modelu w locie.



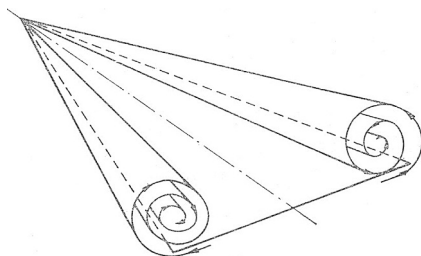
Rys. 1. Rozkłady współczynników C_p (obrazujące ciśnienie wzdłuż cięciwy) na grzbietowej stronie skrzydła skośnego [opracowano na podstawie 7]

Dla skrzydeł delta, podobnie jak dla skrzydeł skośnych, rozkłady ciśnień na profilach są względem siebie przesunięte (rys. 1). W przypadku rozpatrywanych przekrojów a-a i b-b, znajdujące na obu profilach punkty A i B, w układzie skrzydła prostego, leżałyby na tej samej prostej prostopadłej do płaszczyzny symetrii modelu. W układzie skrzydła skośnego punkty te leżą na dwóch różnych prostych, tj. są przesunięte względem siebie. Na tej samej prostej prostopadłej do płaszczyzny symetrii modelu, na której w przekroju b-b znajduje się punkt B, w przekroju a-a znajduje się wówczas punkt A_1 . Przy czym w punkcie A_1 ciśnienie jest wyższe niż w punkcie B, co wynika z faktu, że przedstawiony rozkład ciśnienia obrazuje podciśnienie. Stąd struga ma tendencję do zmiany kierunku od osi symetrii ku końcom skrzydła (rys. 2), zakrzywiając swój tor na skutek wytworzonej różnicy ciśnień.

Przy dużych kątach skosu krawędzi natarcia skrzydła odsysanie strug wzdłuż tej krawędzi wraz z rozkładem ciśnień na profilu stwarza warunki do tworzenia się wiru trąbiastego (rys. 3). Oś takiego wiru jest w przybliżeniu równoległa do krawędzi natarcia i znajduje się ponad górną powierzchnią skrzydła.



Rys. 2. Przebieg strug na grzbietowej stronie skrzydła skośnego [7]



Rys. 3. Tworzenie się wirów trąbiastych na skrzydle delta [7]

Wir trąbiasty zapobiega odrywaniu strug, poprzez ich „przyklejanie” w wewnętrznej części wiru do powierzchni skrzydła. Dzięki temu możliwe jest uzyskanie wzrostu współczynnika siły nośnej C_Z do znacznie większych wartości i kątów natarcia niż przy skrzydle prostym. Skrzydło delta nie traci siły nośnej nawet przy bardzo dużym kącie natarcia, większym niż dla skrzydła skośnego.

Mniejsze ciśnienie panujące wewnątrz wiru powoduje również zwiększenie się podciśnienia na górnej stronie skrzydła, przez co powiększa się uzyskiwana siła nośna [7].

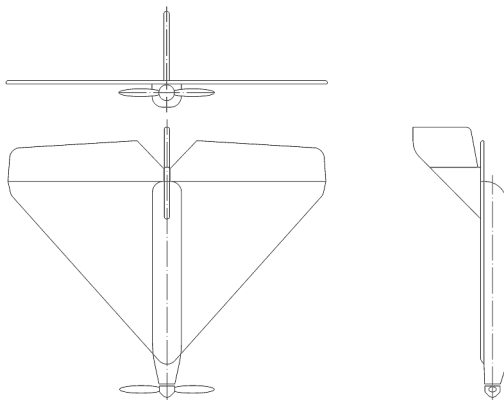
Powstawanie wiru trąbiastego prowadzi jednak do wcześniejszego oderwania strug na końcówkach i w efekcie do spadku efektywności lotek.

Podstawowe wady skrzydła delta, jak w przypadku konstrukcji bezogonowych, to: utrata części siły nośnej, ponieważ część skrzydła (krawędź spływu) jest używana jako powierzchnie sterowe, znaczny spadek prędkości przy gwałtownych manewrach i duża powierzchnia nośna, która może powodować zwiększony opór powietrza i problemy ze sterownością modelu.

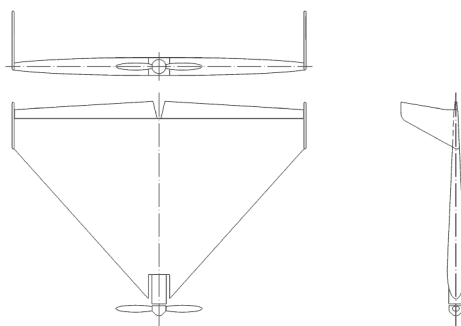
W modelarstwie spotyka się kilka rozwiązań płatowca z zastosowanym układem skrzydeł o kształcie (obrysie) delta. W układzie bezogonowym, wśród nich, można wyróżnić dwa zasadnicze rozwiązania:

- z płaskim skrzydłem i wydzielonym kadłubem (rys. 4),
- z przestrzennym skrzydłem bez wydzielonego kadłuba (rys. 5), określanym jako latające skrzydło w układzie delta.

Podsumowując, skrzydło typu delta charakteryzuje się dość zadawalającymi parametrami i cechami aerodynamicznymi, a przede wszystkim odpowiednią grubością i rozmiarami, co stwarza możliwość montażu na krawędzi natarcia skrzydeł układów z aktywnymi turbulizatorami, często o gabarytowo rozbudowanej konstrukcji i w wymaganej ilości kilku sztuk.



Rys. 4. Płatewiec w układzie skrzydła typu delta z wydzielonym kadłubem



Rys. 5. Płatewiec w układzie latającego skrzydła typu delta, bez wydzielonego kadłuba

Biorąc pod uwagę konieczność zabudowy na pokładzie modeli typu MAV podstawowych elementów ich wyposażenia (serwomechanizmów do sterowania lotkami, pakietu akumulatorów, regulatora napięcia, układu czujników lotu z odbiornikiem radiowym lub układu autopilota z czujnikami) oraz potrzebę zamontowania elementów wyposażenia dodatkowego (np.: modułu sterującego i komunikacyjnego kamery do obserwacji patrolowanego terenu, czujników do wykrywania przeszkód w locie autonomicznym, modułu rejestratora lotu z czujnikami lotu), do tego celu lepiej nadaje się skrzydło przestrzenne bez wydzielonego kadłuba.

2.2. Charakterystyka modelu testowego latającego skrzydła w układzie delta Bullit 02039

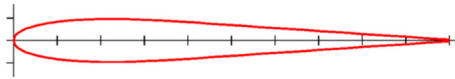
Model latającego skrzydła Bullit 02039 przedstawiono na rysunku 6.

Model ma rozpiętość 840 mm, długość 680 mm. Powierzchnia skrzydeł wynosi 29,5 dm². W konstrukcji skrzydła zastosowano symetryczny profil Bell 540 (rys. 7). Płatewiec modelu wykonano z balsy. Podstawę struktury pławca stanowi przestrzenny szkielet, do którego przytwierdzono poszycie zewnętrzne. Na elementy poszycia zewnętrznego nakleja się folię termokurczliwą. Schemat konstrukcji szkieletu i poszycia zewnętrznego, z uwzględnieniem

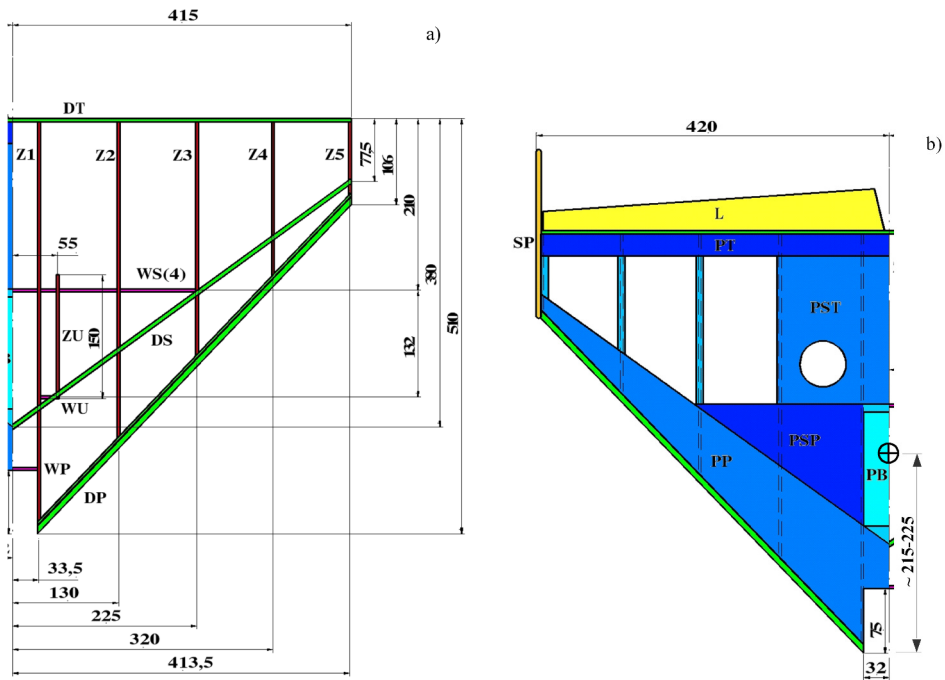
zasadniczych wymiarów, przedstawiono na rysunku 8. Dodatkowo na rysunku zaznaczono położenie środka ciężkości modelu. W przestrzeniach pomiędzy elementami szkieletu i poszycia montowane są elementy układu napędowego, układu sterowania oraz inne wyposażenie.



Rys. 6. Ogólny widok modelu Bullit 02039 [11]



Rys. 7. Zarys profilu Bell 540 [10]



Rys. 8. Schemat konstrukcji płatowca:

- a) szkieletu: Z1-Z5 – żebra główne, ZU – żebro pomocnicze, DP – dźwigar przedni, DT – dźwigar tylny, DS – belka usztywniająca, WP – wręga przednia, WS(4) – zespół czterech wręg środkowych, WU – wręga pomocnicza; pozostałe elementy płatowca: L – lotka, SP – statecznik pionowy;
 b) poszycia: PP – poszycie przednie, PSP – poszycie środkowe przednie, PST – poszycie środkowe tylne, PT – poszycie tylne, PB – poszycie łuku baterii

Na końcach skrzydeł umieszczono pionowe stabilizatory lotu. Do napędu modelu może być zastosowany silnik elektryczny lub spalinowy, montowany z przodu. Sterowanie lotem modelu jest realizowane poprzez regulację siły ciągu śmigła i dwoma lotkami. Zależnie od wersji, ciężar modelu gotowego do lotu wynosi 0,9-1,2 kg.

3. KONCEPCJE ROZWIĄZAŃ

3.1. Ogólna charakterystyka koncepcji

Dla projektowanych układów z aktywnymi turbulizatorami przyjęto dwa warianty rozwiązań, z elementami roboczymi typu makro, w postaci:

- wibrującej kłapy (lub sekcji kłap),
- drgającej membrany (lub sekcji membran).

Do napędu elementów roboczych założono zastosowanie typowych serwomechanizmów modelarskich i piezo-generatorów.

W obu rozwiązaniach generowanie zaburzeń przepływu w postaci mikro-wirów ma polegać na mieszaniu strug powietrza przepływających nad powierzchnią skrzydła z powietrzem odbijanym od powierzchni skrzydła przez wibrujące elementy robocze turbulizatorów.

Intensywność generowanego zjawiska zależy tu od wielkości energii mieszanych strug powietrza i ich wzajemnego stosunku. Energia strugi opływającej skrzydło jest funkcją prędkości lotu modelu. Na energię strugi odbijanej od skrzydła mają wpływ parametry ruchu wibracyjnego elementu roboczego turbulizatora: amplituda, prędkość i częstotliwość.

3.2. Założenia funkcjonalne i konstrukcyjne

Analizując opis i schemat rozmieszczenia turbulizatorów przedstawiony w pracy [5] – (rys. 9), określono dwa warianty rozwiązań układów:

- w przypadku rozwiązania, które wspomagałoby działanie klasycznego układu ze sterami – na płatowcu zostałyby zamontowane cztery zespoły turbulizatorów. Poszczególne turbulizatory zostałyby rozmieszczone na górnej powierzchni skrzydła tuż za krawędzią natarcia, tj. po dwa na lewej i prawej stronie;
- w przypadku rozwiązania, które miałoby całkowicie zastąpić układ z klasycznymi sterami – na płatowcu zostałyby zamontowane osiem zespołów turbulizatorów. Poszczególne turbulizatory zostałyby rozmieszczone tuż za krawędzią natarcia: cztery na górnej powierzchni skrzydła i cztery na dolnej powierzchni skrzydła, tj. po dwa na każdą lewą i prawą stronę.

W obu wariantach turbulizatory mają się cechować odpowiednio dużą powierzchnią ich elementów roboczych.

Powyższe rozwiązania dotyczą rozwiązań docelowych. W przypadku rozwiązania testowego, które zostanie zamontowane i przebadane na uprzednio opisanym modelu Bullit 02039, założono zastosowanie jedynie dwóch pojedynczych wibracyjnych turbulizatorów, zamontowanych na górnej powierzchni skrzydła. W tym układzie, w celu przetestowania zaprojektowanych rozwiązań turbulizatorów, testowy model ma nadal mieć zachowane klasyczne usterzenie.

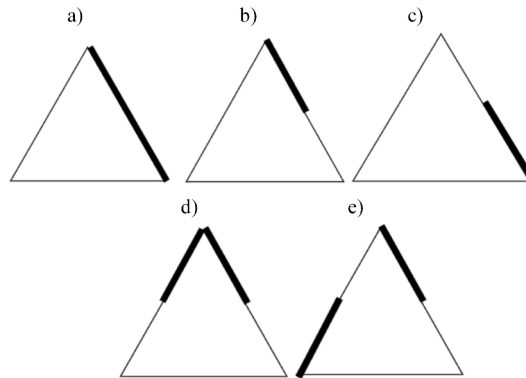
Schemat rozmieszczenia turbulizatorów na testowym skrzydle, uwzględniający zarówno rozwiązania docelowe i rozwiązanie testowe, przedstawiono na rysunku 10.

Pod uwagę brane są dwa rozwiązania napędu modelu: ze śmigłem umieszczonym z przodu (rys. 10a) oraz ze śmigłem umieszczonym z tyłu (rys. 10b). Rozwiązanie z napędem tylnym ma na celu uzyskanie jak największych efektywnych powierzchni roboczych turbulizatorów, separowanych od zaburzeń przepływu, powodowanych przez obracające się śmigło. W przypadku

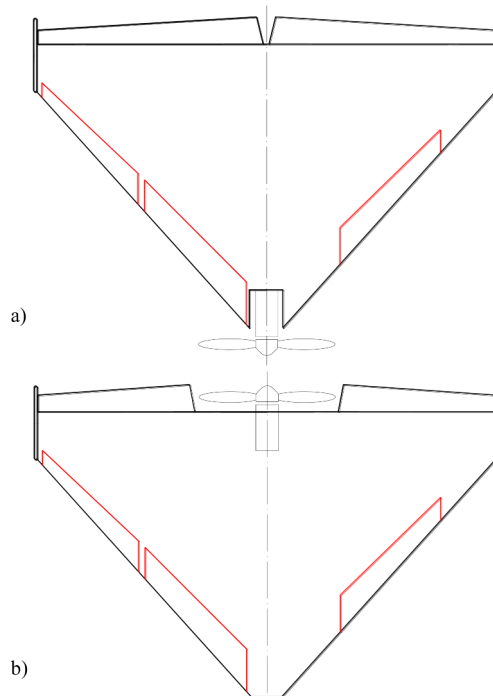
śmigła umieszczonego z tyłu, z uwagi na konieczność skrócenia długości lotek, zakładane jest powiększenie ich szerokości.

Przyjęto następujące założenia konstrukcyjne:

- rozwiązania turbulizatorów mają cechować się prostotą konstrukcji oraz poprawnością technologiczną. Mają być one łatwe w montażu, demontażu i obsłudze oraz sprawne i niezawodne w działaniu,
- do wykonania turbulizatorów mają być zastosowane dostępne na rynku piezo-generatory oraz ultralekkie materiały: balsa, tworzywa sztuczne i stopy aluminium.



Rys. 9. Propozycje rozmieszczenia turbulizatorów na skrzydle typu delta, według [5]

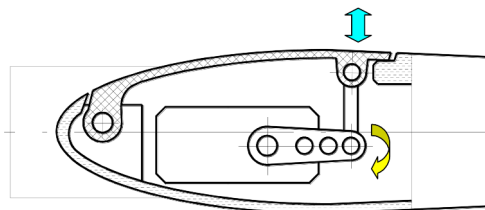


Rys. 10. Obszary zamontowania poszczególnych turbulizatorów w układzie: a) ze śmigłem umieszczonym z przodu, b) ze śmigłem umieszczonym z tyłu

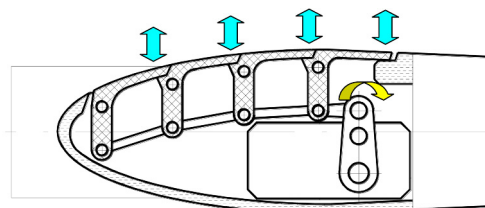
3.3. Rozwiązania z zastosowaniem serwomechanizmów modelarskich

3.3.1. Rozwiązania wstępne

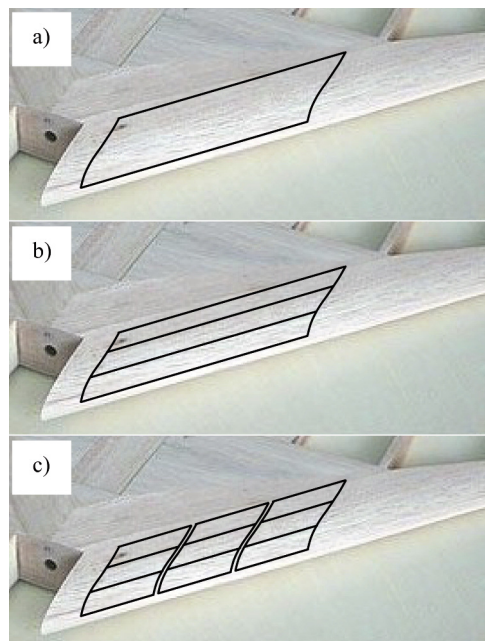
Rozwiązania wstępne turbulizatorów z uchylnymi wibrującymi klapkami, zamontowanymi na górnej powierzchni skrzydła, przedstawiono na rysunkach 11-13. Są to układy w formie pojedynczej klapki (rys. 11, 13a) lub kilku kłapek, zgrupowanych w jednym segmencie (rys. 12, 13b) lub w kilku segmentach (rys. 12, 13c).



Rys. 11. Schemat układu z pojedynczymi ruchomymi klapkami



Rys. 12. Schemat układu z pakietami ruchomych kłapek



Rys. 13. Rozwiązania układów z klapkami: a) pojedynczymi, b) kilkoma w jednym segmencie, c) kilkoma z rozdzielnymi segmentami

3.3.2. Analiza rozwiązań wstępnych

Analizując zaproponowane wstępne rozwiązania układów dostrzeżono kilka poniżej opisanych cech oraz sformułowano następujące wytyczne:

- rozwiązania cechuje możliwość uzyskania dużych przemieszczeń (amplitud ruchu) elementów roboczych turbulizatorów przy niewielkich częstotliwościach, rzędu 1-2 Hz. Amplitudy ruchu powinny wynosić nawet do kilku milimetrów;
- z uwagi na masę serwomechanizmów wykorzystywanych do sterowania standardowym ustawieniem rozpatrywanego modelu, która wynosi około 15-30 gramów30 gramów, w przypadku zastosowaniu kilku (minimum czterech) dodatkowych identycznych serwomechanizmów obsługujących poszczególne turbulizatory, oznacza to wzrost masy modelu o minimum około 60-120 gramów120 gramów;
- w celu odpowiedniego wyważenia modelu poprzez właściwe rozmieszczenie mas składowych elementów układu, wskazane jest maksymalne odsunięcie serwomechanizmów od krawędzi natarcia skrzydła w kierunku jego środka oraz zgrupowanie mechanizmów jak najbliżej osi podłużnej modelu;
- z uwagi na ograniczenie masy modelu zalecane jest ograniczenie liczby składowych elementów roboczych;
- istotnym zagadnieniem jest zapewnienie szczelności, tak aby do wnętrza kadłuba nie mogła przedostać się woda oraz odpowiednie rozwiązanie, które w przypadku dostania się wody do wnętrza kadłuba umożliwiało odprowadzanie jej na zewnątrz.

3.3.3. Rozwiązania końcowe

Mając na uwadze poczynione spostrzeżenia, część z przedstawionych rozwiązań wstępnych turbulizatorów z wibrującymi klapkami mogą być przyjęte jako rozwiązania końcowe. W szczególności dotyczy to układu z pojedynczą klapką, przedstawionego na rysunkach 11 i 13a. Taki układ, z uwagi na dość prostą konstrukcję, jest łatwy do wykonania.

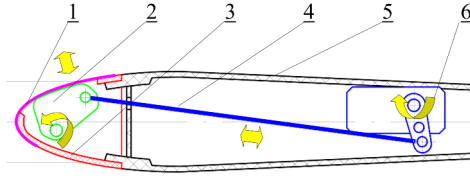
W oparciu o dokonaną analizę zaproponowano również kilka rozwiązań końcowych dla układów turbulizatorów z elementami roboczymi w formie wibrującej membrany. Membrana ma być pobudzana do ruchu poprzez ukryte pod nią dodatkowe elementy. Są to następujące rozwiązania:

a) *układ z membraną odkształcaną przez element wykonujący ruch wahadłowy*

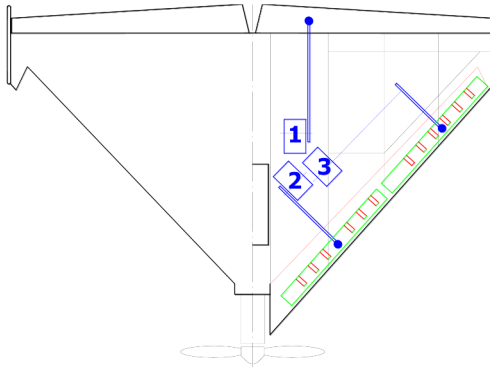
Jako dodatkowy element zastosowano wyprofilowaną ruchomą wkładkę, która wykonuje ruch wahadłowy, wokół punktu jej obrotu (rys. 14). Wkładka posiada kilka odpowiednio uformowanych żeber. Żebra „wchodzą” w wykonane w poszyciu płata skrzydła specjalne wycięcia i wypychają ku górze membranę. Membranę wykonano z elastycznego cienkiego tworzywa i przyklejono ją do powierzchni płata skrzydła. Wkładkę za pomocą długiego cięga połączono z dźwignią napędzającego ją serwomechanizmu.

Po każdej ze stron płatowca, elementy robocze turbulizatorów mają być oddzielone od ich serwomechanizmów. W celu odpowiedniego wyrównoważenia samolotu serwomechanizmy zostaną zamontowane w centralnej części płatowca (rys. 15).

Elementy robocze turbulizatorów mają być zabudowane we wspólnej demontowanej obudowie (jej brak jest widoczny na rysunku 15 – po lewej stronie). Obudowa ma stanowić oddzielną część i ma być przykręcana do zasadniczej części skrzydła. Zewnętrzna powierzchnia obudowy zostanie ukształtowana z zachowaniem zarysu profilu skrzydła;



Rys. 14. Schemat układu: 1 – membrana, 2 – ruchoma obrotowa wkładka z perforowanymi żebrami, 3 – obudowa elementów roboczych turbulizatora, 4 – cięgno, 5 – zasadnicza część skrzydła, 6 – serwomechanizm modelarski



Rys. 15. Schemat rozmieszczenia elementów napędowych:
1 – klasyczny serwomechanizm obsługujący lotki; 2, 3 – serwomechanizmy obsługujące turbulizatory;
po lewej stronie widok modelu ze zdemontowaną obudową

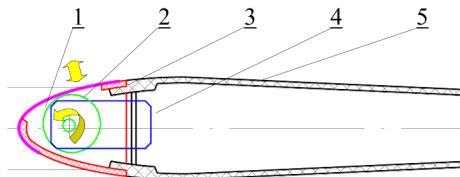
b) *układ z membraną odkształcaną przez element wykonujący ruch obrotowy*

Jako dodatkowy element zastosowano rolkę z kilkoma mimośrodowo zamontowanymi bieżniami (rys. 16). Podobnie, jak w poprzednim rozwiązaniu, poszczególne bieżnie umieszczono pomiędzy wykonanymi w płacie specjalnymi wycięciami. Membranę wykonano z elastycznego cienkiego tworzywa i przyklejono ją do powierzchni płata skrzydła. Napęd układu realizowany jest nie poprzez serwomechanizm modelarski, a poprzez silnik.

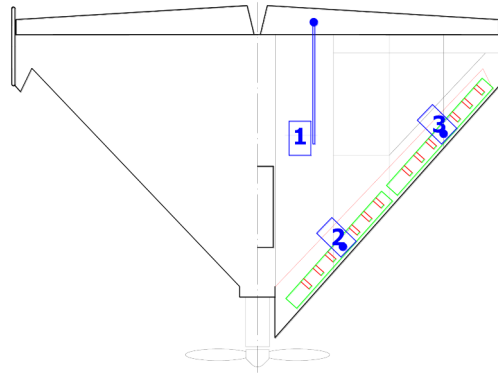
Po każdej ze stron płatowca, elementy robocze turbulizatorów mają być zintegrowane z ich napędem (rys. 17).

Cały układ turbulizatora zamontowano w demontowanej obudowie (jej brak jest widoczny na rysunku 17 – po lewej stronie).

Obudowa ma stanowić oddzielną część i ma być przykręcana do zasadniczej części skrzydła. Zewnętrzna powierzchnia obudowy posiada kształt zarysu profilu skrzydła.



Rys. 16. Schemat układu: 1 – membrana, 2 – obrotowe rolki mimośrodowe, 3 – obudowa elementów roboczych turbulizatora, 4 – silnik, 5 – zasadnicza część skrzydła



Rys. 17. Schemat rozmieszczenia elementów napędowych:

1 – klasyczny serwo-mechanizm obsługujący lotki; 2, 3 – silniki obsługujące turbulizatory; po lewej stronie widok modelu ze zdemontowaną obudową

Rozwiązanie z zastosowanymi silnikami, w odróżnieniu od rozwiązania z serwo-mechanizmami modelarskimi, cechuje możliwość uzyskania większych częstotliwości pobudzeń membrany, z ich dodatkową regulacją poprzez zmianę prędkości obrotowej silnika.

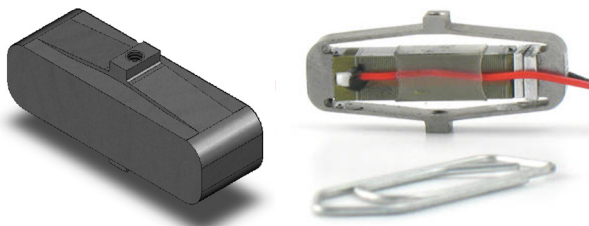
Przestawione rozwiązania dzięki możliwości łatwej wymiany wkładki o różnych kształtach jej żeber lub przesuwania układu rolki mimośrodowo stwarzają możliwość doboru najkorzystniejszej charakterystyki turbulizatora, przybliżając lub oddalając punkt oderwania strug powietrza od krawędzi natarcia skrzydła.

Istotnym zagadnieniem jest odpowiedni dobór serwo-mechanizmów i silników w zakresie następujących wymaganych parametrów: wymiarów, prędkości działania, momentu obrotowego i masy. Niezmiernie ważne jest również odpowiednie rozmieszczenie tych elementów, tak aby uniknąć stosowania dodatkowych mas, w celu wyrównoważenia modelu.

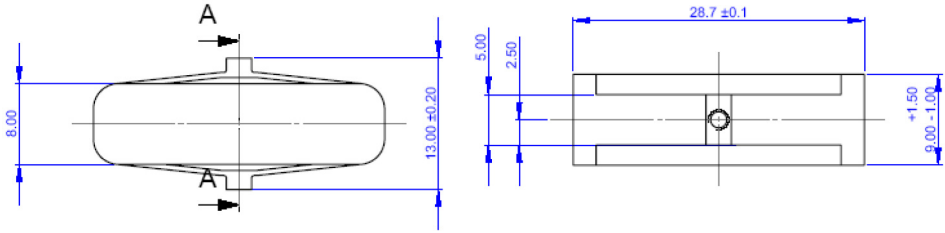
3.4. Rozwiązania z zastosowaniem piezo-generatorów

3.4.1. Piezo-generatory – dane techniczne

W konstrukcji turbulizatorów przewidziano zastosowanie piezo-generatorów typu APA 120S francuskiej firmy Cedrat Technologies o masie 7,2 gramów (rys. 18 i 19) w układzie ze wzmacniaczami CAu10 o masie 2 gramów. Cechuje je możliwość uzyskania częstotliwości ruchu drgającego na poziomie $f = 7100$ Hz i amplitudy $A = 140$ μm , w stanie pracy bez obciążenia.



Rys. 18. Piezo-generator APA 120S [9]

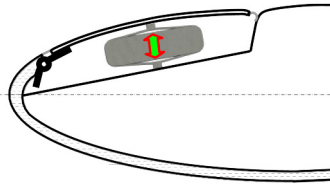


Rys. 19. Główne wymiary piezo-generatora APA 120S [9]

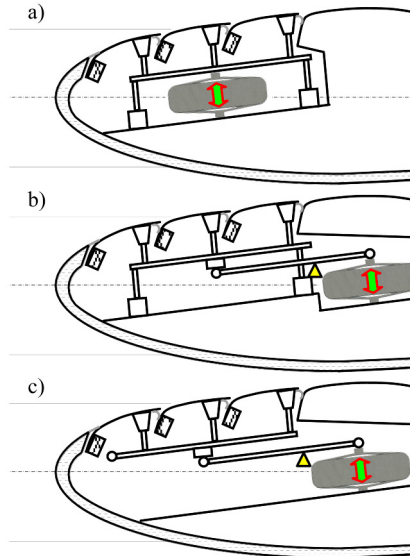
3.4.2. Rozwiązania wstępne

Rozwiązania wstępne turbulizatorów, z zastosowanymi piezo-generatorami, które sterują elementami roboczymi w postaci drgającej klapki lub układu kłapek, przedstawiono na rysunkach 20 i 21.

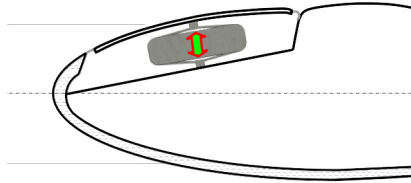
Na rysunku 22 przedstawiono rozwiązanie wstępne turbulizatora, z zastosowanym piezo-generatorem, który steruje elementem roboczym w postaci drgającej membrany. W najprostszej formie taki układ może być uzyskany poprzez przyklejenie piezo-generatora do cienkiej giętkiej płytki, wykonanej z tworzywa sztucznego.



Rys. 20. Schemat układu z drgającą pojedynczą klapką



Rys. 21. Schematy układów z drgającymi kłapkami: a) o jednakowym skoku, b) o jednakowym wydłużonym skoku, c) o niejednakowym wydłużonym skoku



Rys. 22. Schemat układu z drgającą membraną

3.4.3. Analiza rozwiązań wstępnych

Analizując rozwiązania wstępne turbulizatorów oraz parametry funkcjonalne zastosowanych piezo-generatorów typu APA 120S, dostrzeżono kilka poniżej opisanych cech oraz sformułowano następujące wytyczne:

- przemieszczenie i prędkość elementów roboczych (klap / membran) muszą być na tyle duże aby wygenerować odpowiednią prędkość powietrza wymaganą do skutecznego zakłócenia strugi powietrza przepływającej nad płatem skrzydła i tym samym do wywołania zjawiska mikro-wirów;
- rozwiązania cechuje brak możliwości uzyskania dużych przemieszczeń (amplitud ruchu) elementów roboczych turbulizatorów. Dają one jednak możliwość uzyskania dużych częstotliwości ruchu, rzędu kilku tysięcy Hz, która w praktyce ulegnie zapewne obniżeniu (wytłumieniu) do poziomu kilkudziesięciu lub kilkuset Hz, z uwagi na zastosowane elementy konstrukcyjne i połączenia kinematyczne w układzie;
- konieczne jest maksymalne uproszczenie konstrukcji, z wyeliminowaniem zbędnych węzłów kinematycznych;
- istotnym zagadnieniem jest możliwość regulacji częstotliwości pracy elementów roboczych turbulizatorów, z uwzględnieniem: prędkości lotu, kąta natarcia i innych parametrów lotu;
- elementy robocze turbulizatorów powinny wykonywać ruch oscylacyjny z możliwie największymi amplitudami, przy czym należy sprawdzić jego wymagany zakres częstotliwości;
- istotnym zagadnieniem jest zapewnienie szczelności układu, tak aby do wnętrza kadłuba nie mogła przedostawać się woda oraz odpowiednie rozwiązanie, tak aby w przypadku dostania się wody do wnętrza kadłuba móc ją odprowadzić na zewnątrz.

3.4.4. Obliczenia wstępne turbulizatorów

Istotnym zagadnieniem przy projektowaniu konstrukcji tabulatorów jest oszacowanie ich wymiarów i wielkości charakteryzujących kinematykę ich ruchu drgającego.

W celu osiągnięcia efektywnego działania turbulizatorów tj. odrzucenia przepływających cząsteczek powietrza od powierzchni skrzydła i wzbudzenia zawirowań strugi, założono osiągnięcie przez drgające elementy robocze (membrany / kłapy) turbulizatorów przyspieszeń na poziomie minimum $1G = 9,81 \text{ m/s}^2$.

Przy tak zdefiniowanym warunku należy określić konieczny do uzyskania zakres częstotliwości ruchu przy znanej wartości amplitudy ruchu.

Dla zaproponowanej konstrukcji rozwiązań turbulizatorów z zastosowaniem piezo-generatorów APA 120S przyjęto, że amplituda ruchu ich elementów roboczych (membran / kłap) będzie wynosiła $A \approx 0,08 \text{ mm}$.

W obliczeniach wykorzystano podstawowe zależności (1) opisujące przemieszczenie, prędkość i przyspieszenie w ruchu harmonicznym oraz zależność (2), która opisuje związek pomiędzy częstością kołową i częstotliwością drgań.

$$y = A \cdot \sin(\omega t)$$

$$\dot{y} = A \omega \cdot \cos(\omega t) \quad , \quad (1a-c)$$

$$\ddot{y} = -A \omega^2 \cdot \sin(\omega t)$$

$$\omega = 2\pi \cdot f \quad , \quad (2)$$

gdzie: A – amplituda, ω – częstość kołowa drgań, f – częstotliwość drgań.

Podstawiając do (1c) zależność (2), otrzymuje się:

$$\ddot{y} = -A \cdot 4\pi^2 f^2 \cdot \sin(\omega t), \quad (3)$$

a następnie, pomijając funkcję harmoniczną $-\sin(\omega t)$, zależność na wymaganą częstotliwość drgań, w funkcji przyspieszenia i amplitudy:

$$f = \sqrt{\frac{\ddot{y}}{A \cdot 4\pi^2}} \quad (4)$$

Uzyskane wymagane częstotliwości drgań dla określonych zakresów przyspieszeń i przyjętej wartości amplitudy drgań $A \approx 0,08$ mm, obliczone na podstawie powyższej zależności, zestawiono w tab. 1.

Tab. 1. Wymagane częstotliwości drgań przy określonych zakresach przyspieszeń

przyspieszenie [m/s ²]	10	20	30	40
wymagana częstotliwość [Hz]	56,3	79,6	97,5	112,5

Analizując otrzymane wyniki obliczeń wstępnych i dane techniczne piezo-generatorów APA 120S można stwierdzić, że przy częstotliwościach ich działania dochodzących do 7100 Hz istnieje realna możliwość zastosowania zaproponowanych rozwiązań turbulizatorów do generowania wirów.

W dalszej szczegółowej analizie dla przyjętych układów z membranami i kłapkami należy brać pod uwagę postacie ich drgań własnych.

Kolejne ważne zagadnienie dotyczy wyznaczenia wymaganego minimalnego wymiaru elementu roboczego turbulizatora.

Założono, że aby móc generować mikro-wiry, minimalny wymiar elementu roboczego turbulizatora w osi podłużnej modelu, dla określonych dowolnych: prędkości lotu modelu i częstotliwości działania turbulizatora, powinien zapewnić każdej przepływającej cząsteczce powietrza jej minimum jednorazowe odbicie od drgającej powierzchni turbulizatora.

Do wyznaczenia takiej zależności wykorzystano zależności (5) i (6). Pierwsza z nich określa czas pokonania danej drogi w ruchu ze stałą prędkością, a druga czas trwania pełnego okresu drgań w funkcji częstotliwości.

$$t = \frac{x}{v} \quad (5)$$

gdzie: x – droga (wymiar elementu roboczego turbulizatora), v – prędkość (cząsteczki powietrza),

$$t = T = \frac{1}{f}, \quad (6)$$

gdzie: T – okres drgań, f – częstotliwość drgań (elementu roboczego turbulizatora).

Przyrównując obie strony zależności (5) i (6), po dokonaniu przekształceń, otrzymuje się:

$$x = \frac{10^6 \cdot v}{3600 \cdot f}, \quad (7)$$

gdzie: x – wymiar elementu roboczego turbulizatora [mm], v – prędkość lotu modelu [km/h], f – częstotliwość drgań elementu roboczego turbulizatora [Hz].

Dla określonych prędkości lotu i częstotliwości ruchu drgającego turbulizatora, minimalne wymiary (membrany / klapy) turbulizatora w osi podłużnej modelu, zostały zestawione w tab. 2.

Tab. 2. Minimalne wymiary turbulizatora w funkcji prędkości lotu i częstotliwości jego drgań

częstotliwość drgań turbulizatora [Hz]	prędkość lotu modelu [km/h]			
	10	20	50	100
50	55,5	111,1	277,8	555,5
100	27,8	55,5	138,9	277,8
250	11,1	22,2	55,5	111,1
500	5,5	11,1	27,8	55,5
1000	2,8	5,5	13,9	27,8

Przedstawione wyniki, przy założeniu, że wymiar powierzchni roboczej turbulizatora będzie wynosił $x \approx 20$ mm, a prędkość lotu modelu $v \approx 100$ km/h, wskazują na konieczność zwiększenia częstotliwości działania elementu roboczego (membrany / klapy) turbulizatora do poziomu powyżej 1000 Hz.

Należy mieć na uwadze, że omawiane zagadnienie jest bardziej złożone. Częstotliwość drgań turbulizatora zapewniająca jego najbardziej efektywne działanie jest funkcją prędkości lotu. Wraz ze zmianą prędkości lotu ulegają zmianie (odchyleniu) tory strug powietrza opływającego skrzydło. Strugi powietrza po powierzchni skrzydła poruszają się z prędkościami różnymi od prędkości lotu modelu. Ponadto należy również uwzględnić postacie drgań własnych elementów roboczych (membran / klap) turbulizatora.

3.4.5. Rozwiązania końcowe

Mając na uwadze poczynione spostrzeżenia i wyniki obliczeń zaproponowano kilka rozwiązań turbulizatorów z elementami roboczymi w formie wibrującej membrany. Są to następujące rozwiązania:

- a) *układ z drgającą membraną pobudzaną do drgań dwoma piezo-generatorami* (rys. 23-25)
 Układ opiera się na zastosowaniu turbulizatora z elementem roboczym w postaci drgającej membrany. Membrana wprawiana jest w ruch poprzez swobodnie zamontowaną drgającą ramkę osadzoną na dwóch piezo-generatorach. Piezo-generatory zamontowano do szkieletu skrzydła. Ramka może być wykonana:
 - z kilkoma owalnymi końcówkami, które „wchodzą” w wykonane w płacie skrzydła otwory i pobudzają do drgań membranę (rys. 23),
 - w formie pojedynczego płata, który „wchodzi” w wykonany w płacie skrzydła dopasowany kształtem otwór i pobudza do drgań membranę (rys. 24).

Powierzchnie robocze ramki stykające się z membraną mają posiadać specjalnie wykonane perforacje w celu zwiększenia efektu drgań membrany.

Membranę wykonano z elastycznego cienkiego tworzywa i przyklejono ją do powierzchni płata skrzydła. Zapewnia ona wodoszczelność całemu układowi.

Cały układ turbulizatora może być zainstalowany w demontowanej obudowie, która może być montowana do czoła skrzydła (rys. 25a) lub jako część montowana w skrzydle od jego górnej powierzchni (rys. 25b). Zewnętrzna powierzchnia obudowy ma mieć kształt rozpatrywanego profilu skrzydła. Zaletą przedstawionej koncepcji z zastosowaniem demontowanej obudowy jest możliwość łatwej zmiany i doboru elementów układu turbulizatora (ilości, wielkości i kształtu otworów w płacie skrzydła, końcówek i ramki oraz materiału membrany). Układ turbulizatora może być również wykonany bezpośrednio w skrzydle (rys. 25c). Jego montaż będzie wymagał wykonania otworów w skrzydle i pomocniczej kłapy od spodu skrzydła;

b) *układ z drgającą membraną pobudzaną do drgań pojedynczym piezo-generatorem* (rys. 26-28)

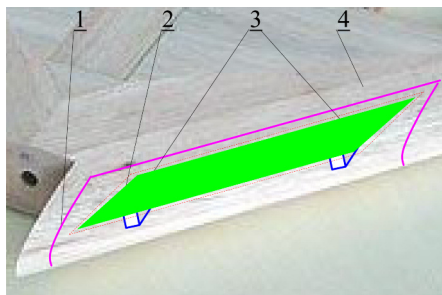
Układ opiera się na zastosowaniu turbulizatora z elementem roboczym w postaci drgającej membrany. Membrana wprawiana jest w ruch poprzez drgającą ramkę. W odróżnieniu od poprzedniego rozwiązania, gdzie zastosowano ramkę swobodnie spoczywającą na dwóch piezo-generatorach, ramka została poprzez specjalne uszczelki w kilku punktach elastycznie zamocowana do powierzchni wokół otworów wykonanych w płacie skrzydła. Pozwala to na wprawianie do drgań ramki przy użyciu zamocowanego do niej pojedynczego piezo-generatora, którego drugi koniec przytwierdzono do szkieletu skrzydła. Podobnie jak dla poprzedniego rozwiązania, ramka może być wykonana:

- z kilkoma owalnymi końcówkami, które „wchodzą” w wykonane w płacie skrzydła otwory i pobudzają do drgań membranę (rys. 26),
- w formie pojedynczego płata, który „wchodzi” w wykonany w płacie skrzydła dopasowany kształtem otwór i pobudza do drgań membranę (rys. 27).

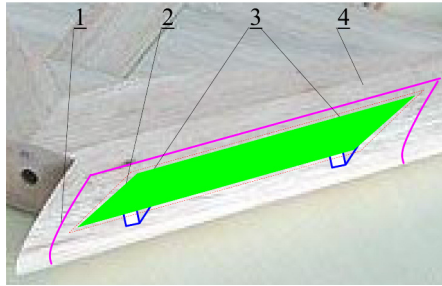
Powierzchnie robocze ramki stykające się z membraną mają posiadać specjalnie wykonane perforacje w celu zwiększenia efektu drgań membrany.

Membranę wykonano z elastycznego cienkiego tworzywa i przyklejono ją do powierzchni płata skrzydła. Zapewnia ona wodoszczelność całemu układowi.

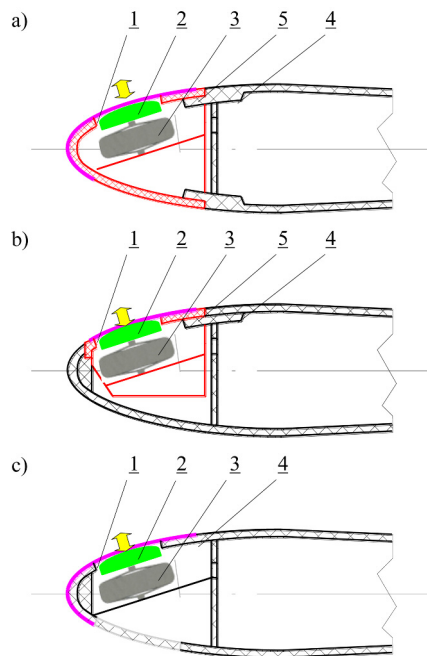
Cały układ turbulizatora może być zainstalowany w demontowanej obudowie, która może być montowana do czoła skrzydła (rys. 28a) lub jako część montowana w skrzydle od jego górnej powierzchni (rys. 28b). Może to być też układ wykonany bezpośrednio w skrzydle (rys. 28c).



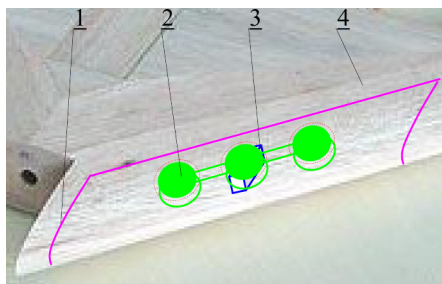
Rys. 23. Schemat układu z drgającą membraną pobudzaną przez dwa piezo-generatory w układzie z kilkoma owalnymi końcówkami ramki: 1 – membrana, 2 – ramka z owalnymi końcówkami, 3 – piezo-generatory, 4 – zasadnicza część skrzydła



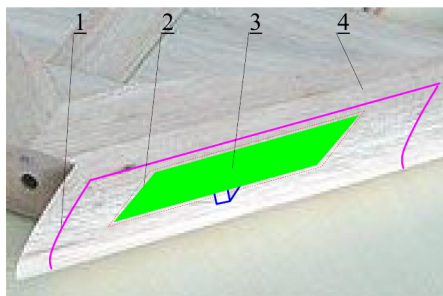
Rys. 24. Schemat układu z drgającą membraną pobudzaną przez dwa piezo-generatory w układzie z pojedynczym płatem ramki: 1 – membrana, 2 – ramka z pojedynczym płatem, 3 – piezo-generator, 4 – zasadnicza część skrzydła



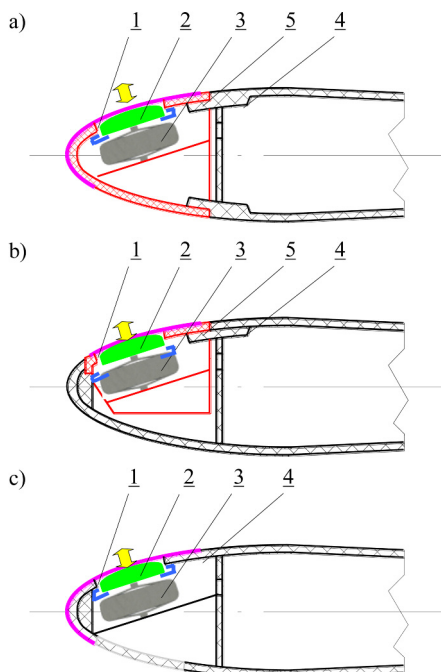
Rys. 25. Schemat zamocowania układu: 1 – membrana, 2 – ramka, 3 – piezo-generator, 4 – zasadnicza część skrzydła, 5 – obudowa



Rys. 26. Schemat układu z drgającą membraną pobudzaną przez pojedynczy piezo-generator w układzie z kilkoma owalnymi końcówkami ramki: 1 – membrana, 2 – ramka z owalnymi końcówkami, 3 – piezo-generator, 4 – zasadnicza część skrzydła



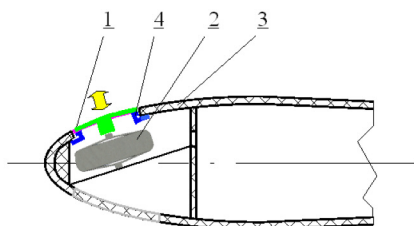
Rys. 27. Schemat układu z drgającą membraną pobudzaną przez pojedynczy piezo-generator w układzie z pojedynczym płatem ramki: 1 – membrana, 2 – ramka z pojedynczym płatem, 3 – piezo-generator, 4 – zasadnicza część skrzydła



Rys. 28. Schemat zamocowania układu: 1 – membrana, 2 – ramka, 3 – piezo-generator, 4 – zasadnicza część skrzydła, 5 – obudowa

Wadą koncepcji opartej o zastosowanie dwóch piezo-generatorów jest konieczność zastosowania aż dwóch takich elementów oraz zapewnienia synchronizacji ich działania. Taki układ pozwala jednak na zastosowanie większych rozmiarów powierzchni roboczej turbulizatora i uzyskanie większego zakresu amplitud ruchu niż dla układu z pojedynczym piezo-generatorem.

W celu wyeliminowania membrany, która może powodować wytłumienie drgań o wyższych częstotliwościach zaproponowano układ, gdzie rolę elementu roboczego przejmuje odpowiednio wyprofilowana ramka (rys. 29). Jest ona zamocowana i uszczelniana przez specjalną uszczelkę. Ramka pobudzana jest do drgań przez pojedynczy piezo-generator lub dwa piezo-generatory zamocowane do zasadniczej części skrzydła.



Rys. 29. Schemat układu z drgającą ramką pobudzaną przez pojedynczy lub przez dwa piezo-generatory: 1 – ramka, 2 – piezo-generator (y), 3 – zasadnicza część skrzydła, 4 – element mocujący i uszczelniający ramkę

4. ROZWIĄZANIE PROJEKTOWE

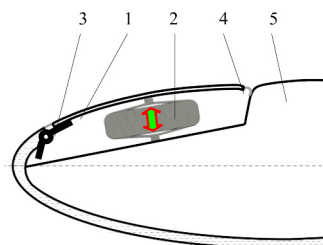
Proponowane rozwiązanie projektowe układu z wibracyjnymi turbulizatorami uwzględnia uprzednio zdefiniowane wytyczne i opracowane założenia konstrukcyjne.

4.1. Ogólna charakterystyka koncepcji układu

Spośród opracowanych koncepcji turbulizatorów wybrano układ typu drgająca klapka. Niniejszy projekt, o charakterze rozwiązania testowego, dotyczy jedynie zastosowania na omówionej konstrukcji latającego skrzydła Bullit 02039 dwóch pojedynczych turbulizatorów wibracyjnych.

Turbulizatory zostaną zamontowane na górnej powierzchni rozpatrywanego skrzydła, w obszarze za krawędzią natarcia: po jednym z lewej i prawej strony skrzydła. Jako elementy robocze obu turbulizatorów zastosowano pojedyncze klapki o wymiarach i kształcie odpowiadającym wielkościom ustalonym w trakcie obliczeń wstępnych oraz wyprofilowaniu powierzchni płata.

Schemat rozwiązania zespołu pojedynczego turbulizatora przedstawiono na rysunku 30. Klapka turbulizatora zamocowana jest uchylnie wzdłuż jej czołowej krawędzi do struktury płatowca, a bezpośrednio z nią połączony piezo-generator wprawia ją w wibracje. W celu uzyskania jak największej wartości amplitudy ruchu klapki, piezo-generator zostanie usytuowany jak najbliżej osi zamocowania klapki.



Rys. 30. Schemat układu turbulizatora z drgającą klapką: 1 – klapka, 2 – piezo-generator, 3 – zawias, 4 – uszczelnienie klapki, 5 – struktura płatowca

Sterowanie lotem modelu poprzez aktywne generowanie zjawiska zaburzeń przepływu w postaci mikro-wirów ma polegać na załączaniu odpowiedniego turbulizatora z określonymi parametrami wibracji jego elementu roboczego (klapki), tj. amplitudą i częstotliwością. Zmiana tych parametrów sygnałowo ma być realizowana poprzez odpowiednio zaprojektowany i wykonany w tym celu układ elektroniczny. Układ ten będzie przetwarzał sygnał identyczny jak do sterowania serwomechanizmami na odpowiedni sygnał cyfrowy w standardzie wejścia wzmac-

niacza CAu10 piezo-generatora APA 120S.

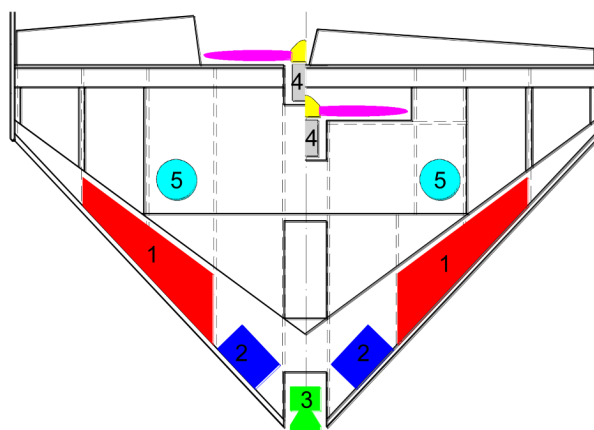
Mając na uwadze, że układ z wibracyjnymi turbulizatorami będzie zamontowany na omówionej konstrukcji latającego skrzydła Bullit 02039, w celu uzyskania możliwości bezpiecznego testowania zaprojektowanych rozwiązań turbulizatorów w locie, rozpatrywany model ma nadal mieć zachowane dotychczasowe klasyczne usterzenie.

4.2. Lokalizacja turbulizatorów na skrzydłach modelu testowego

Schemat rozmieszczenia turbulizatorów na rozpatrywanym modelu Bullit 02039 przedstawiono na rysunku 31. Na rysunku uwzględniono lokalizację pozostałych przewidzianych do zamontowania w przedniej części płatowca elementów wyposażenia modelu: kamery i czujników do detekcji przeszkód.

Istotnym zagadnieniem jest odpowiednie rozmieszczenie poszczególnych elementów wyposażenia modelu, tak aby uzyskać wymagane jego wyważenie (położenie środka ciężkości). Według producenta, dla dotychczasowej konstrukcji modelu, środek ciężkości powinien się znajdować w odległości 215÷225 mm od przedniej krawędzi płatowca.

Zaproponowany sposób rozmieszczenia poszczególnych układów w przedniej części skrzydła spowoduje konieczność przeniesienia napędu (silnika elektrycznego) na tył płatowca. Propozycje lokalizacji silnika przedstawiono na rysunku 31. Sposób widoczny po lewej stronie będzie wymagał skrócenia długości lotek. W celu zachowania dotychczasowej wielkości powierzchni lotek niezbędne będzie zwiększenie ich wymiaru w osi podłużnej modelu. Sposób widoczny po prawej stronie umożliwi zachowanie dotychczasowej konstrukcji lotek, spowoduje jednak większą ingerencję w strukturę płatowca. Wybór pomiędzy opcjami będzie zależny od wyposażenia modelu i mas poszczególnych jego elementów.



Rys. 31. Lokalizacja poszczególnych układów modelu: 1 – turbulizatory do generowania mikro-wirów, 2 – czujniki do detekcji przeszkód, 3 – kamera, 4 – silnik z piastą i śmigłem, 5 – gniazda przeznaczone do zamocowania serwomechanizmów do sterowania lotkami

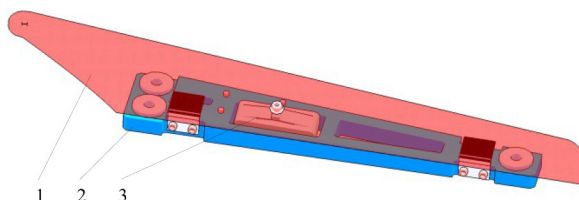
4.3. Opis konstrukcji turbulizatorów

Turbulizatory zaprojektowano jako lekkie, modułowe konstrukcje, z wyeliminowaniem zbędnych węzłów kinematycznych, łatwe w montażu i demontażu. Widok kompletnego zespołu turbulizatora przedstawiono na rysunku 32. Oba turbulizatory są identyczne w konstrukcji. Zostały

one zamontowane na modelu testowym, od jego górnej powierzchni (rys. 33).

Zespół pojedynczego turbulizatora składa się z następujących zasadniczych elementów:

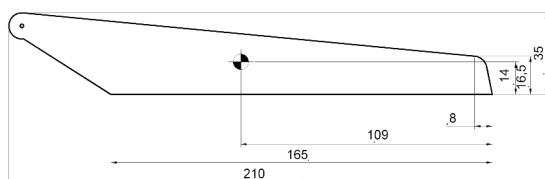
- piezo-generatoru typu APA 120S w układzie ze wzmacniaczem CAU10, który służy jako źródło napędu elementu roboczego turbulizatora;
- elementu roboczego typu ruchoma wibrująca klapka. Jako klapkę lewego i prawego turbulizatora zastosowano łopaty od modeli śmigłowców. Są to elementy wykonane z tworzywa sztucznego. Wymiary łopat (rys. 34) odpowiadają wymogom ustalonym w trakcie obliczeń wstępnych, a ich kształt wyprofilowaniu powierzchni płata modelu Bullit 02039. Powierzchnie łopat wynoszą około 50 cm^2 ;
- podstawy, która służy jako rama do zamocowania klapki i piezo-generatora. Podstawę wykonano z poliwęglanu.



Rys. 32. Zespół turbulizatora: 1 – ramka, 2 – podstawa z zawiasami i tulejkami montażowymi, 3 – piezo-generator APA120S



Rys. 33. Widok modelu testowego Bullit 02039 z zamontowanymi turbulizatorami



Rys. 34. Główne wymiary łopat zastosowanych jako elementy robocze turbulizatorów

PODSUMOWANIE

Przedstawione koncepcje i rozwiązanie projektowe układu wibracyjnych turbulizatorów wykazują możliwość ich praktycznego wykonania i zastosowania.

Opracowane i zaimplementowane na modelu testowym latającego skrzydła w układzie delta Bullit 02039 rozwiązanie układu z wibracyjnymi turbulizatorami, z zastosowaniem piezo-ge-

neratorów APA 120S, uwzględnia uzyskanie jak najmniejszej masy modelu testowego (około 1-1,5 kg), przy zachowaniu wymaganych własności aerodynamicznych (jak najmniejszy opór), odpowiednio dużej wytrzymałości konstrukcji, dużej elastyczności w zakresie możliwości jej testowania oraz możliwość regulacji częstotliwości pracy elementów roboczych turbulizatorów.

W celu weryfikacji zaproponowanego rozwiązania wymagane jest przeprowadzenie badań w tunelu aerodynamicznym i badań w locie.

Praca finansowana ze środków budżetowych na naukę w latach 2009-2011 jako projekt rozwojowy nr O R00 0059 06.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Abłamowicz A.: Podstawy aerodynamiki i mechaniki lotu. Wydaw. Komunikacji i Łączności, Warszawa 1980.
- [2] Galiński C.: Kluczowe problemy w projektowaniu mikrosamolotów i entomopterów. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2006.
- [3] Huang A. i inni: Applications of MEMS devices to delta wing aircraft: from concept development to transonic flight test. AIAA, Reno, Nevada, 01-0124, January, 2001.
- [4] Lee G-B. i inni: Leading-edge vortices control on a delta wing by micromachined sensors and actuators. Journal of American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1999.
- [5] Lee G-B. i inni: Robust vortex control of a delta wing by distributed MEMS actuators, Journal of Aircraft, Vol. 37, No. 4, 2000.
- [6] Schier W.: Miniaturowe lotnictwo: abc modelarstwa lotniczego: zasady lotu, materiały i konstrukcje, napęd i sterowanie, rekreacja i sport. Wyd. Komunikacji i Łączności, Warszawa 1986.
- [7] Staszek J.: Mechanika lotu modeli latających. Wyd. Komunikacji i Łączności, Warszawa 1986.
- [8] Strzelczyk P.: Aerodynamika małych prędkości. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2003.
- [9] <http://www.cedrat.com>
- [10] <http://saumodelarnia.fora.pl>
- [11] <http://www.topmodelcz.cz>

PAWEŁ OSTAPKOWICZ

CONCEPTIONS OF SOLUTIONS OF VIBRATORY MANEUVERING DEVICES FOR THE FLIGHT CONTROL OF UNMANNED AERIAL VEHICLES TYPE MAVS (MICRO AIR VEHICLES)

Abstract

In the paper conception and design solutions of systems with vibratory vortex generators to generate flow disturbance on the wings of unmanned aerial vehicles type MAVs (micro air vehicles) has been presented. Systems type macro, with elements in the form of vibrating flaps and membranes, are taken into account. As drive units, standard servo motors used in the model-making and piezo-actuators, were used. Preliminary the conceptions of such systems with vibratory vortex generators and next the design solution of such system have been showed. Additionally, accepted functional and constructional assumptions, analysis of elaborated construction and basic kinematic calculations have been also presented.