

Praca przejściowa inżynierska

**Algorytm wyznaczania parametrów silnika
turbowentylatorowego z wykorzystaniem
programu Matlab**

Konrad Malik

Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa
Zakład Silników Lotniczych

28 czerwca 2015

Spis treści

1	Wstęp	2
2	Instalacja	3
3	Praca z programem	4
3.1	Single point calculation	4
3.1.1	Calculation options	4
3.1.2	Post-processor	5
3.2	Characteristics	7
3.2.1	Calculation options	7
3.2.2	Post-processor	7
4	Częste błędy	9
5	Bibliografia	10

1 Wstęp

Celem mojej pracy było stworzenie programu, który nie wymaga do pracy zainstalowanego Matlab'a i potrafi dobrze zastąpić program AEDsys, głównie jego podstawowe funkcje. Dodatkowo, obliczenia wykonywane będą w układzie jednostek SI oraz nie będzie problemów z instalacją i używaniem go na najnowszych systemach Windows.

Tworząc ten program bazowałem na wymienionym AEDsys oraz na książce jego autora: J. Mattingly - Aircraft Engine Design [1]. Obliczenia zaimplementowane w moim skrypcie są zgodne z pracą: [2].

Program pozwala na obliczanie parametrów w przekrojach silników turbo-wentylatorowych z dwoma wylotami oraz z dopalaczem dla z góry zadanych warunków lotu, bądź na wykonanie charakterystyk według wysokości, liczby Macha lub obu na raz. Wszystkie obliczenia wykonywane są dla uproszczonego modelu ze stałym ciepłem właściwym.

Jeśli wystąpi potrzeba na zaimplementowanie innego typu silnika proszę o kontakt.

Dołączony do tejże pracy program można dowolnie kopiować, rozpowszechniać i używać.

W razie problemów, pytań, błędów w programie itp. proszę o kontakt:

konrad.malik@gmail.com

Postaram się odpowiedzieć i nanieść odpowiednie poprawki.

Ten dokument zawiera instrukcję instalacji i używania programu "Turbine engine calculator".

2 Instalacja

Instalacja programu przebiega standardowo jak każdej innej aplikacji. Dostępny jest plik instalacyjny:

engine_calculator_setup.exe

Plik waży dość dużo. Sam program to około 1 MB natomiast cała reszta to darmowe biblioteki Matlaba niezbędne do prawidłowego działania aplikacji.

Aby rozpocząć instalację należy otworzyć wymieniony wyżej plik exe i postępować wedle instrukcji wyświetlanych na ekranie.

Użytkownik będzie miał możliwość wyboru lokalizacji, gdzie zostanie zainstalowany zarówno sam program, jak i biblioteki Matlaba. Lokalizację można wybrać dowolnie.

Po skończonej instalacji program należy uruchomić albo ze skrótu na pulpicie, albo z katalogu gdzie został on zainstalowany poprzez kliknięcie na plik z rozszerzeniem *.exe. Może się on dość długo ładować ze względu na wspomniane obszerne biblioteki, które muszą się wczytać podczas każdego startu programu.

3 Praca z programem

3.1 Single point calculation

Moduł "Single point calculation" wykonuje obliczenia w każdym z charakterystycznych przekrojów silnika, dokładnie opisanych w [1].

Po wybraniu tego modułu należy wybrać typ silnika, którym chcemy się zajmować.

Uwaga: Wybraną przez nas opcję trzeba kliknąć, tak by zrobiła się niebieska, inaczej program nie przejdzie dalej.

Po wybraniu typu silnika należy kliknąć przycisk "Proceed". Wczytany zostanie moduł o nazwie "Calculation options". To tutaj możemy ustawić wszystkie parametry, zarówno lotu jak i samego silnika, przyjęte do obliczeń.

3.1.1 Calculation options

Ważna uwaga: Wszystkie liczby do programu należy wprowadzać z kropką, nie z przecinkiem.

Flight parameters

W tym okienku ustawić możemy parametry lotu w postaci wysokości, liczby Macha oraz wydatku masowego powietrza przepływającego przez silnik (pośrednio zaimplementowany przekrój wlotu).

Engine properties

Tutaj wybieramy predefiniowane poziomy technologiczne silnika. Od tego wyboru zależą sprawności sprężarek, turbin, wlotu, wylotu itp. a więc i straty ciśnienia na tych podzespołach. Dokładne wartości sprawności dobranych na podstawie tego okienka będzie można podejrzeć i zapisać do pliku w post-procesorze.

Uwaga: Należy zaznaczyć że wybranie tutaj np. zbieżno-rozbieżnej dyszy wylotowej nie znaczy, że taka będzie w silniku. Zastosowanie typu dyszy wylotowej zależy tylko i wyłącznie od wyniku obliczeń i wybierane jest automatycznie przez program. Wybory w tym okienku dotyczą tylko i wyłącznie sprawności i nazewnictwo ma charakter poglądowy.

Fuel properties

Jak sama nazwa wskazuje, w tym okienku mamy możliwość ustawienia właściwości paliwa, a konkretnie jego wartości opałowej.

Engine parameters

W tym okienku możemy wpisać szczegółowe parametry silnika, są to:

- Bypass ratio - stopień dwuprzepływowości
- π_F - spręż wentylatora (spręż dla kanału zewnętrznego)
- π_C - spręż całego zespołu sprężarki (spręż dla kanału wewnętrznego)
- π_F/π_{LPC} - stosunek sprężu wentylatora do sprężu sprężarki niskiego ciśnienia

- Tt4 (Tt7) - temperatura całkowita przed turbiną (za dopalaczem). Po wprowadzeniu wartości "-1" wybrane zostaną domyślne wartości tych temperatur wynikające bezpośrednio z wybranych poziomów technologicznych silnika w "Engine properties".
- Bleed air - ułamek wydatku masowego powietrza odprowadzony ze sprężarki na potrzeby płatowca (nie wraca do obiegu)
- Cooling air #1 - ułamek wydatku masowego powietrza odprowadzony ze sprężarki na potrzeby chłodzenia łopatek zespołu turbin (wraca do obiegu)
- Cooling air #2 - j.w., dokładny opis przeznaczenia jednego jak i drugiego upustu - por. [1].

Mach numbers in sections

Są to domyślne wartości (z programu AEDsys) liczby Macha w kilku przekrojach. Narzucenie ich z góry jest konieczne w tych miejscach, aby obliczenia mogły zostać przeprowadzone. Jeśli jakaś wartość zostanie nieumyślnie zmieniona to aby wrócić do ustawień domyślnych wystarczy wpisać "-1".

Po ustawieniu wszystkich wartości obliczenia zostaną przeprowadzone gdy klikniemy przycisk "Calculate!" i przejdziemy tym samym do modułu "Post-processor".

3.1.2 Post-processor

Po dokonaniu obliczeń pojawi się okno post-procesora. Pozwala ono na obejrzenie wyników w postaci tabeli lub wykresu oraz zapisanie ich do pliku gotowego do wczytania przez dowolny arkusz kalkulacyjny (jako znak rozdzielający kolumny należy wybrać tabulator). Wykresy zapisać można do dowolnego z kilku popularnych formatów obrazów.

Saving results to *.txt

W tym okienku możemy wybrać dowolne nazwy każdego z plików gotowych do zapisania. Ich zawartość bezpośrednio odpowiada zawartości ich odpowiedników w "Results". Klikając na odpowiednie przyciski można zapisać dany plik.

Uwaga: Każdy plik zapisywany jest do głównego katalogu gdzie zainstalowany został program (domyślnie będzie to C:\Program Files\Turbine.engine.calculator) i nie można tego zmienić.

Graphs

Tutaj można wyświetlić i zapisać wybrany wykres ilustrujący wyniki. Możliwe jest wybranie przepływu (wewnętrzny lub zewnętrzny), wartości na osi X oraz wartości na osi Y. Zapisywanie ich do pliku odbywa się już przez interfejs Matlaba w okienku po wyświetleniu danego wykresu.

Bardzo ważna uwaga: Wartości do wykreślenia (przepływ i osie) należy wybierać po kolei (z góry do dołu). Jeśli chcemy zmienić przepływ np. na zewnętrzny należy jeszcze raz po kolei przeklikać wszystkie pola związane z wykresem, nawet jeśli chodzi o wybranie ponownie tej samej opcji. To bardzo ważne, ponieważ gdy tak nie zrobimy, programowi najprawdopodobniej pomiesza się wszystkie wartości i nie wykreśli tego co byśmy chcieli.

Results

W tym okienku można wybrać i obejrzeć wyniki w postaci liczbowej. Aby wyświetlić okienko z wynikami należy jednokrotnie kliknąć na wybrany element listy. Oto opis dostępnych opcji:

- Internal flow parameters - parametry silnika w przepływie wewnętrznym
- External flow parameters - parametry w przepływie zewnętrznym
- Given parameters - dane parametry takie jak sprężę, wysokość lotu, liczba Macha itp.
- Engine efficiencies - sprawności silnika wygenerowane z ustawień poziomu technologicznego w "Engine properties"
- Main engine parameters - ogólne parametry silnika takie jak ciąg jednostkowy, jednostkowe zużycie paliwa itp.

Po dokonaniu obliczeń można zamknąć program bądź kliknąć "Main menu" by wrócić do ekranu startowego i wykonać inne obliczenia.

3.2 Characteristics

Moduł "Characteristics" oblicza ogólne parametry silnika (analogicznie do Main engine parameters w Post-processor - Results) oraz kilka dodatkowych wartości i tworzy charakterystyki silnika: wysokościową, po liczbie Macha lub obie na raz. W tym module nie podejrzmy wyników w charakterystycznych przekrojach, występują one tylko w "Single point calculation".

Jako że większość opcji, ustawień oraz ogólna obsługa modułu są identyczne jak w "Single point calculation" to skupię się wyłącznie na różnicach i charakterystycznych cechach, a po dokładniejsze opisy powtarzających się elementów będę odsyłał do odpowiedniej sekcji tej instrukcji.

Wybierając ten moduł analogicznie jak poprzednio należy wybrać typ silnika (kliknąć tak, by został podświetlony na niebiesko), a następnie wybrać interesujące nas charakterystyki. Niezależnie od wybranej opcji reszta ustawień i okien nie różni zbytnio od siebie i będziemy je rozpatrywać jako jedną całość.

Proszę zwrócić uwagę na rozdzielenie charakterystyk. Z tego podziału wynika, że nie można wybrać charakterystyki wysokościowej i po liczbie Macha wybierając krok jednej z nich jako "0", czyli, de facto, tworząc później iterację po jednej zmiennej. W kodzie programu stworzy to w jednym miejscu dzielenie przez zero. Skrypt to wykryje i nie ruszy dalej dopóki nie zmienimy tej wartości ale niestety nie pokaże błędu.

3.2.1 Calculation options

Ważna uwaga: Wszystkie liczby do programu należy wprowadzać z kropką, nie z przecinkiem.

Flight parameters

Okno parametrów lotu różni się od swojego odpowiednika do obliczeń dla jednego punktu. Znaczenie każdej wartości jest takie samo jak poprzednio, jednak tym razem możemy zauważyć dodatkowe pola opisane "Start", "Step" oraz "End". Niezależnie od wybranej przez nas opcji charakterystyk, pole "Start" oznacza wartość początkową iteracji, "Step" to krok o jaki będzie ona zwiększana, a "End" to wartość, która zostanie obliczona jako ostatnia.

Uwaga: W przypadku wybrania wartości końcowej niemożliwej do dokładnego osiągnięcia z dobranego "Start" i "Step", program skończy charakterystyki na następnej wartości (większej) możliwej do osiągnięcia od "End".

Inne okienka

Parametry znajdujące się w innych okienkach są identyczne jak w module "Single point calculation", z tego powodu po dokładny ich opis odsyłam do odpowiedniej części tej instrukcji: 3.1.1.

Klikając przycisk "Calculate!" przejdziemy do modułu post-procesora dla charakterystyk.

3.2.2 Post-processor

Results

Jedyną rzeczą, która wyróżnia ten post-procesor od swojego odpowiednika z

modułu "Single point calculation" to rodzaje dostępnych wyników. Są to:

- Iteration results - zawiera wyniki iteracji zebrane w tabelę
- Given parameters - zawiera początkowe parametry lotu, sprężę itp.
- Engine efficiencies - zawiera sprawności wynikające z wybranego poziomu technologicznego silnika

Inne okienka

Po instrukcję obsługi i możliwości wszystkich okienek w post-procesorze odsyłam do części: 3.1.2, gdyż są one bardzo podobne.

Po dokonaniu i zapisaniu obliczeń program można zamknąć lub użyć przycisku "Main menu" by powrócić do ekranu startowego.

4 Częste błędy

W niniejszej części instrukcji opisałem najczęstsze błędy w działaniu programu i to, jak sobie z nimi poradzić. Jeśli występuje jakiś nieopisany tutaj problem proszę o kontakt.

- "Pressure before outlet lower than atmospheric!"; "Complex values in output!"; "Outlet internal velocity lower than inlet (negative internal specific impulse)!"

Te okienka z błędem często wyskakują jednocześnie, choć nie muszą. W zasadzie komunikaty mówią same za siebie. Silnik z podanymi parametrami nie mógłby działać. Powietrze mogłoby wlecieć przez wylot silnika zamiast z niego wylecieć z powodu zbyt niskiego ciśnienia statycznego przed dyszą wylotową. Wyniki takich obliczeń są co najmniej dziwne: ujemny ciąg jednostkowy czy wspomniane liczby zespolone.

Aby rozwiązać ten problem należy zwiększyć spręż silnika, zwiększyć temperaturę przed turbiną/w dopalaczu, bądź zmniejszyć stopień dwuprzepływowości.

- Po kliknięciu "Calculate!" nic się nie dzieje

Ten błąd występuje gdy wprowadzimy jakiś parametr źle, np. gdy krok charakterystyk jest ujemny lub zerowy, itd.

- Pomimo wybrania przepływu i osi wykres rysowany jest źle/nie jest rysowany

O tym problemie wspomniałem podczas opisu post-procesora. Rysując wykresy zawsze należy wybierać opcje od góry do dołu, po kolei. Zmieniając przepływ należy wybrać wszystkie wartości jeszcze raz, nawet jeśli oznacza to kliknięcie ponownie dokładnie tej samej opcji.

5 Bibliografia

- [1] Jack D. Mattingly, *Aircraft Engine Design, Second Edition*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Reston, Virginia, 2003
- [2] S. Antas, P. Wolański, *Obliczenia termogazodynamiczne lotniczych silników turbinowych*, Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1989
- [3] <http://www.mathworks.com/help/matlab/>, dostęp 20.06.2015