

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ДВИЖЕНИЕТО НА АВТОМАТ – НАКЛОНИТЕЛ СИСТЕМА „HILLER–BELL“ В СРЕДА AUTODESK INVENTOR

Константин Методиев

*Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
e-mail: komet@space.bas.bg*

Ключови думи: Autodesk Inventor, автомат – наклонител

Резюме: Цел: Изучаване на движението на автомат – наклонител система „Hiller – Bell“ от радиоуправляем модел на хеликоптер.

Метод: Създаване на триизмерен модел на ротора на хеликоптера в развойна среда Autodesk Inventor v.2016. Изследване на траекторията на различни точки от механизма чрез модул Dynamic Simulation.

Резултати: Симулация на движението на ротора. Определяне на интервала на изменение на стъпката на лопатите на винта.

STUDY OF HILLER–BELL ROTOR MOTION IN AUTODESK INVENTOR IDE

Konstantin Metodiev

*Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: komet@space.bas.bg*

Keywords: Autodesk Inventor, swashplate

Abstract: Objective: Studying Hiller – Bell rotor motion of a remotely controlled helicopter.

Method: A three dimensional model development of the helicopter rotor in Autodesk Inventor integrated development environment v.2016. Studying path of distinct mechanism points by means of the Dynamic Simulation module.

Results: Rotor motion simulation. Determination of pitch angle scope of rotor main blades.

Въведение

Продуктът Autodesk Inventor®, разработван от американската компания Autodesk Inc., е развойна среда по машиностроене. Той се състои от модули, позволяващи изследването на възли и детайли от машини на различни етапи от тяхното проектиране. Така например е възможно да се определят напрежения и деформации в детайли и сглобени единици по метода на крайните елементи, да се изследват фермени конструкции, да се проектира инструментална екипировка, окабеляване, детайли от листов материал, тръбопроводи и др. Продуктът разполага с голяма база данни от стандартизирани машинни елементи. Възможно е да се зададе материал на всеки детайл и по такъв начин да се определят неговите масови характеристики точно. Предлагат се модули за проектиране на различни видове предавки.

Модулът Dynamic Simulation позволява да се изследва динамиката на движение на детайлите от изследваната машина. Посредством задаване на стойности на сили, скорости и ускорения, като гранични условия, механизмът се привежда в движение. Изучаването на движението на елементи от механизма позволява да се оптимизира неговата конфигурация преди производството на първия прототип.

В настоящото изследване е моделирано движението на автомат – наклонител система Hiller – Bell на мащабен модел на хеликоптер, изпълнен по схема с опашен винт, фиг. 1. Целта на изследването е експериментално да се установи диапазона от ъгли на атака на лопатите на

носещия винт. Задачата е симулация на движението на ротора за различни стойности на цикличната и обща стъпка, респ. положение в пространството на подвижната тарелка.



Фиг. 1. Общ вид на хеликоптера в среда Autodesk Inventor

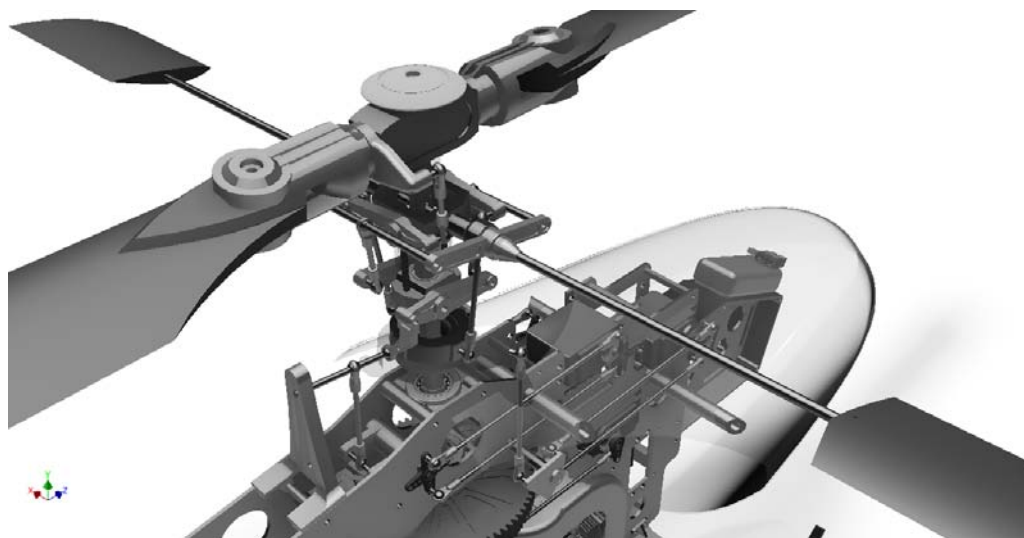
Теория

В авиомоделизма са разпространени три основни схеми на автомат – наклонител за модели на хеликоптери: Bell, Hiller и хибридна, [1]. В система Bell автомат – наклонителят е свързан директно с лопатите на ротора, броят на които в повечето случаи е два. Предимство на тази схема е бързата реакция на машината при изменение на цикличната стъпка. Системата за управление контролира директно стъпката на лопатите на носещия винт и затова хеликоптерът реагира бързо на управляващи команди. Недостатък на схемата е малката устойчивост на хеликоптера при косо обтичане в хоризонтален полет. В този случай натоварването на винта е асиметрично, защото настъпващата лопата генерира най-голяма подемна сила, а отстъпващата – най-малка. Образува се силен наклонящ момент от страничното изместване на вектора на теглителната сила. Освен това свързващите щанги са допълнително натоварени, поради директната им връзка с тежките лопати на ротора. Това налага използването на серво машинки с голям въртящ момент. Първите варианти на схема Bell използват стабилизиращ лост, който е монтиран перпендикулярно на осите на лопатите и има тежести в двата си края. Ролята на този лост е управляващ жirosкоп, [2]. Това осигурява устойчивост на хеликоптера, като в случай на случайни колебания на планера жirosкопът прецесира и променя стъпката на лопатата в нужния азимут чрез диференциална люлка. По настоящем малко хеликоптери използват класическа схема Bell на ротора, поради изброените недостатъци (Bell UH-1H).

Схемата Hiller допринася за по-добра устойчивост на хеликоптера. Автомат – наклонителят не управлява директно стъпката на лопатите. Вместо това механизмът променя цикличната стъпка на малки серволопати, свързани със стабилизиращ лост, монтиран от своя страна перпендикулярно на осите на лопатите с хоризонтален шарнир. Колебанието на лоста променя цикличната стъпка и маховото движение на лопатите на носещия винт в зависимост от азимута. Схемата има две основни предимства. Серво машинките са малко натоварени поради това, че те управляват директно стъпката на серволопатите на стабилизиращия лост. Серволопатите от своя страна имат жirosкопични свойства като маси по краищата на въртящия се лост. Недостатък на схемата е закъснение при изпълнение на команда. За да се измени стъпката на лопата е необходимо първо да се промени стъпката на серволопатата, което отнема време. По настоящем два популярни хеликоптера използват ротор схема Hiller: Piccolo ECO/Fun и GWS Dragonfly.

Схемата Hiller – Bell е хибрид на гореизброените. Тази схема представлява смесител на наклона на стабилизиращия лост и наклона на подвижната тарелка в автомат – наклонителя. Стъпката на серволопатите на стабилизиращия лост се управлява от щанги, свързани с тарелката, аналогично на схема Hiller. Съществуват обаче и щанги, които изменят стъпката на лопатите на винта директно в зависимост от ъгъла на подвижната тарелка, подобно на схема Bell. Така стъпката на лопатите (респ. маховото движение) се управлява от два входни сигнала

– наклона на стабилизиращия лост и наклона на подвижната тарелка, които се смесват механично. Когато тарелката се наклони от серво машинките, пряката връзка между нея и лопатите на винта предизвиква незабавно изменение на стъпката на последните. Стъпката на серволопатите на стабилизиращия лост също се управлява от тарелката чрез двузвенник и диференциална люлка. Това от своя страна води до наклон на стабилизиращия лост, фиг. 2, а от там и на изменение на стъпката на носещите лопати в зависимост от азимута. Схемата има следните предимства. Необходими са сравнително по-слаби серво машинки за управление на тарелката. Схемата е по-стабилна от тази на Bell. Цикличната стъпка се изменя по-бързо от тази при схемата на Hiller, поради наличието също и на пряка връзка между лопатите на винта и тарелката. Недостатъците на схемата включват по-бавно изменение на цикличната стъпка от тази при схемата на Bell, както и сложна механична конструкция. По настоящем три популярни хеликоптера използват схемата на Hiller – Bell в ротора. Това са Hensleit 3DNT, Hensleit 3DMP и Century Hummingbird Elite CP. Подробни сведения за работата на различните схеми на ротори за носещия винт са дадени в [3].



Фиг. 2. Автомат – наклонител схема Hiller – Bell

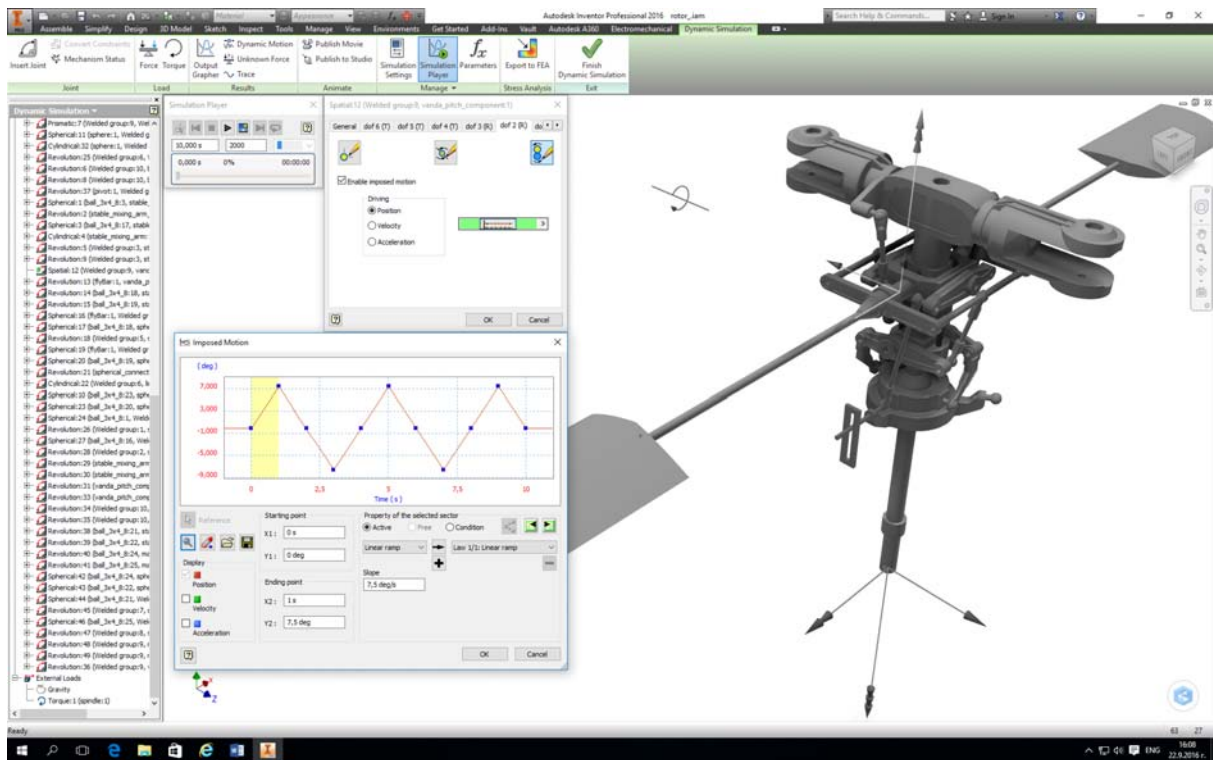
Методология

Моделирането на отделните детайли на хеликоптера не е предмет на настоящия доклад. Читателят може да направи справка в помощното меню на продукта за основните похвати за създаване на скици и прилагането към тях на инструментите за тримерно моделиране. За доклада е достатъчно само да се спомене, че общият брой на детайлите е приблизително 150.

Основните механизми на хеликоптера, а именно опашка, носещ винт и двигател, са сглобени в отделни файлове и в следствие добавени в общата сглобка с активирана опция от контекстното меню Flexible в Model Browser. Този похват на работа дава допълнително удобство при сглобяването на модела.

Особеност на проведената симулация е ограничената възможност да се моделира точно маховото движение на балансиращия лост. Причината е неизвестната аеродинамична сила, действаща на серволопатите на лоста при изменение на тяхната циклична стъпка. Възможно е обаче маховото движение на лоста да се въведе предварително в симулацията с известно приближение. За целта в модула Dynamic Simulation се добавя нова става от тип Spatial. В контекстното меню Properties се редактира една от трите степени на свобода, представляващи ротационното движение на лоста спрямо шпиндела. Добавя се т.нар. Imposed Motion, като в графичния редактор се задава закона за изменение на съответния ъгъл. Примерен диалог е показан на фиг. 3. Повече подробности за реализацията на описаната техника са посочени в статия [4].

За определяне на закона за движение на стабилизиращия лост, за един оборот на винта, се използва приблизителна методика за пресмятане на външните моменти, действащи на механичната система. От тези моменти с най-голямо влияние е аеродинамичният, който се образува при обтичането на серволопатите на различни стъпки. Маховото движение на стабилизиращия лост зависи от двоица сили, действаща едновременно на двете серволопати.



Фиг. 3. Диалогът Imposed Motion за задаване на маховото движение на стабилизиращия лост

За пресмятане на аеродинамичната сила, действаща на серволопатата се допуска, че тя е тънка пластина. От теоретичната аеродинамика е известна картината на обтичане на пластината след конформна трансформация на единична централна окръжност по Жуковски. Големината на силата, действаща на пластина с единична дължина, се определя съгласно израза, [5]:

$$(1) \quad P = 2\pi a \rho v_{\infty}^2 \sin \alpha$$

където $2a$ е дължината на хордата на профила на серволопатата, m ; ρ е плътността на въздуха, kg/m^3 ; v_{∞} и α са респ. скоростта, m/s , на несмутения поток и стъпката, rad , на серволопатата. За да се получи аеродинамичният момент, формула (1) се умножава по дължината на серволопатата и разстоянието от центъра на налягане до оста на въртене на винта.

Аеродинамичната сила, действаща на серволопатата, зависи от стъпката α , а тя от своя страна – от цикличната стъпка, задавана с подвижната тарелка. Законът за изменение на цикличната стъпка може да се измери в средата на Autodesk Inventor и в последствие да се експортира в Excel. За тази цел е необходимо да се зададе постоянна ъглова скорост на въртене на винта чрез въвеждане на нова става Spatial между шпиндела и фиксиран неподвижен в модела елемент. Примерна траектория на точка от серволопатата за един оборот на винта е показана на фиг. 4.

За определяне на маховото движение на стабилизиращия лост се решава числено система уравнения на Ойлер, описваща движението в свързана координатна система на тяло с една неподвижна точка:

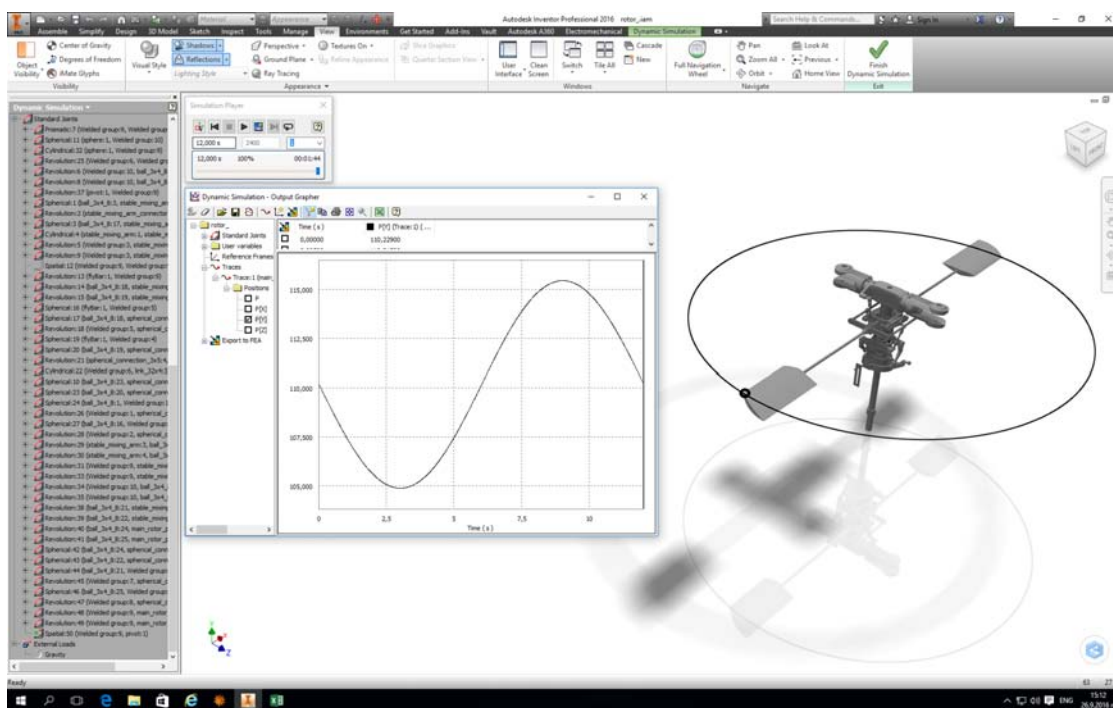
$$(2) \quad I\ddot{\omega} + \dot{\omega} \times (I\dot{\omega}) = M$$

където векторът $\omega = \|\theta \ \phi \ \psi\|^T$ съдържа ъглите на отклонение на стабилизиращия лост, I е симетричен тензор, съдържащ осовите и центробежни инерционни моменти, а $M = \|\|M_x \ M_y \ M_z\|^T$ е векторът на външните за механичната система моменти. Система (2) е валидна ако свързаните оси са главни инерционни. Маховото движение на стабилизиращия лост се описва от второто уравнение в система (2). Координатната система е дясно ориентирана по осите на лоста и шпиндела. Векторният компонент M_z е приравнен на нула, тъй като ъгловата скорост на шпиндела не се изменя по условие. Това води до постоянен кинетичен момент на ротора и нулева компонента на външния момент по оста на носещия винт. Векторният компонент M_y се получава от аеродинамичния анализ на обтичането на серволопатата. Векторният компонент M_x е с малък порядък и се получава от въздействието на лостовата система при промяна на цикличната стъпка на серволопатата.

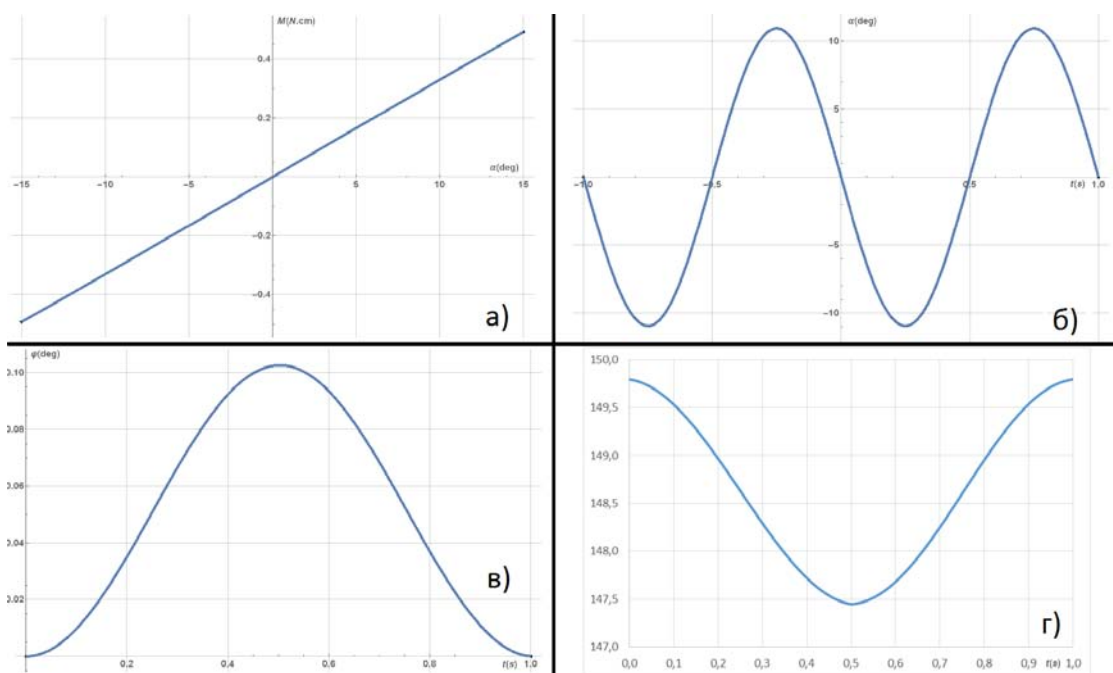
Резултати

За тестов случай бе избрана постоянна ъглова скорост на въртене на ротора от 60 rpm и ъгъл на подвижната тарелка от +7.5 deg при азимутален ъгъл на лопатата 0 deg (над опашката). При интегрирането на диференциалните уравнения е използван продуктът Wolfram Mathematica v. 10.4. Инерционните моменти на стабилизиращия лост се определят от контекстното меню на Model Browser iProperties/Physical.

Междинните резултати са показани на фиг. 5 както следва: а) аеродинамичен момент [N.cm] от една серволопатата за различни стъпки [deg] и фиксирана периферна скорост; б) стъпка на серволопатата [deg] във времето [s] за един оборот по фиг. 4; в) махово движение [deg] на стабилизиращия лост за един оборот [s] (числено решение на второто уравнение на система (2)); г) вертикално отклонение на атакуващия ръб [mm] на носещата лопата във времето [s].



Фиг. 4. Траектория на точка от стабилизиращия лост



Фиг. 5. Резултати

По данните от фиг. 5 г) се определя диапазонът, в който се изменя стъпката на лопатата на носещия винт: 7 deg.

Заклучение

Резултатите от проведената симулация са точни ако се приеме, че детайлите на механизма са идеално твърди и не се деформират по време на движение. Еластичните деформации на отделните детайли и възли от конструкцията могат да се моделират при необходимост в модула Stress Analysis по метода на крайните елементи. Повечето детайли обаче не претърпяват деформации по време на въртенето на ротора. Изключение правят лопатите на носещия винт. Тяхното пространствено движение е сложно поради влиянието на аеродинамичните и масови сили. Продуктът Autodesk Inventor не предлага модул за решаване на куплираната задача за взаимодействие на флуид и твърдо тяло. Това ограничава възможностите за моделиране на маховото движение на лопатата. Друг недостатък от същия характер, както вече бе описано в изложението, е ограничената възможност да се моделира точно маховото движение на балансиращия лост.

Важно е да се направи уточнението, че полученият закон за движение на стабилизиращия лост е валиден само при нулеви стойности на ъглите на крена и тангажа за хеликоптера, т.е. при режим висене. Изобщо динамиката на движение на ротора е зависима от стойностите на Ойлеровите ъгли на летателния апарат. В случай на маневриране ъглите на елементите на ротора трябва да се трансформират в собствена свързана координатна система. Повече подробности за динамиката на ротора по време на маневриране на хеликоптера могат да се намерят в статия [6].

Въпреки посочените недостатъци, описаната симулация на движението на ротора има ред предимства. Възможно е например да се получат стойностите на траекторията, скоростта и ускорението на точки от детайли от механизма, които в реалността са трудно достъпни за наблюдение и измерване. Резултатите дават предварителна информация за нивото на правдоподобност и приложимост на механизма на етапа на неговото проектиране. С помощта на модула Contact Solver например може да се установи нежелан физически контакт между детайлите на механизма. Възможно е също детайлите да се сглобят с предписаните допуски и сглобки.

Движението на отделните възли от хеликоптера може да се наблюдава на адрес [7]. Моделът може да бъде изтеглен безплатно от адрес [8].

Литература:

1. <http://www.swashplate.co.uk/ehbg-v16/ch23s03.html>
2. Йорданов, Д., Летателни апарати. Системи за управление, стр. 200, библиотека на катедра „Въздушен транспорт“, ТУ-София, Мадара принт АД, 1999
3. Дмитриев, И. С., С. Ю. Есаулов, Системы управления одновинтовых вертолетов, стр. 45, 54, Машиностроение, Москва, 1975
4. <https://knowledge.autodesk.com/support/inventor-products/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2015/ENU/Inventor-Help/files/GUID-8CA019EE-3E10-491C-BFFB-9EC353043C0E-htm.html>
5. Валландер, С., Лекции по гидроаэромеханике, стр. 158, Издательство Ленинградского университета, Ленинград, 1978
6. Kim, S., D. Tilbury, Mathematical Modeling and Experimental Identification of an Unmanned Helicopter Robot with Flybar Dynamics, Journal of Robotic Systems, 21(3), 95-116, Wiley Periodicals, Inc., 2004
7. <https://www.youtube.com/watch?v=NhkAlfBEqjg>
8. <https://grabcad.com/library/yet-another-rc-heli-1>