

УДК 629.7.05

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭКРАНОПЛАНом

С.А. Бродский

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
Россия, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А

А.Ю. Княжский

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
Россия, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А
E-mail: knjagskij@mail.ru

А.В. Небылов

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
Россия, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А

А.И. Панферов

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
Россия, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А

Ключевые слова: экраноплан, пилот в контуре управления, экранный эффект; система управления движением; нелинейное управление.

Аннотация: Рассматривается проблема синтеза системы управления движением летательного аппарата в зоне действия экранного эффекта и комплексной обработки показаний контрольно-измерительных приборов, которая позволяет пилоту осуществлять интерактивное управление не выводя систему из области безопасного маневрирования в окрестности балансировочных режимов с учетом структурной и параметрической неопределенности модели. Система самодиагностики органов управления и идентификации динамических параметров экраноплана в составе системы управления, определяет критические изменения в параметрах, инициируя перенастройку параметров системы управления и изменение текущего режима полета, вплоть до аварийной посадки. Отмечены особенности построения модели динамики и расчета аэродинамических сил и моментов на основе результатов виртуальной "продувки" с использованием CFD COMSOL Multiphysics.

1. Введение

Экраноплан – перспективный, но вместе с тем очень сложный в пилотировании летательный аппарат [1-3]. Практически невозможно создать конструкцию с собственной устойчивостью на всем диапазоне изменения параметров движения [4,5]. Балансировка экраноплана обеспечивается комплексным многоканальным нелинейным управлением многочисленными аэродинамическими поверхностями и двигательной установкой [6]. Интуитивное вмешательство пилота в сложные законы управления нередко приводило к катастрофе [7-9]. Вместе с тем мы не ставим задачу обеспечить полностью автоматическое управление движением летательного аппарата с пассажирами. Основная цель

проводимых исследований – создать единую систему пилот-автопилот, позволяющую осуществлять эффективное управление, когда свобода пилотирования ограничивается только условиями безопасности, определяемыми краткосрочным прогнозом параметров движения на основе адекватной математической модели летательного аппарата и комплексной обработки показаний контрольно-измерительных приборов. Структурные и параметрические изменения в модели в процессе полета, внезапные и плавные, должны приводить к соответствующему изменению законов управления, приводящему к новому балансировочному режиму [10,11]. При этом автопилот продолжает исполнять указания пилота в рамках безопасного коридора, информируя пилота о возможных последствиях, формируя в подсознании пилота дальнейшую стратегию.

2. Общая постановка задачи

Для больших экранопланов становится актуальным создание пилотажно-навигационного комплекса нового поколения, включающего системы прецизионного измерения параметров движения вблизи поверхности и вне экрана, законы, алгоритмы и средства управления движением, системы отображения пилотажной информации экипажу и контроля действий экипажа в критических режимах, структурно-избыточные каналы и элементы управления для обеспечения отказоустойчивости системы.

В рамках исследований рассматривается возможность применения САУД для реализации практических задач, среди которых:

- использование большого экраноплана как стартовой платформы для запуска беспилотных летательных аппаратов;
- полет при интенсивном морском волнении;
- безопасное маневрирование в горизонтальной плоскости в зоне действия экрана с большими углами крена, позволяющее обходить неожиданно возникающие препятствия;
- система управления должна гарантировать безопасную посадку на воду в случаях полного или частичного отказа двигательной установки, повреждения одного или нескольких каналов управления закрылками, рулем высоты, элеронами;
- система должна ограничивать все действия экипажа, которые могут привести к потере устойчивости и аварии;
- система самодиагностики органов управления и идентификации динамических параметров экраноплана должна быть в составе системы управления, критические изменения в параметрах должны вызывать перенастройку параметров системы управления и приводить к изменению текущего режима полета, вплоть до аварийной посадки;
- крейсерский режим должен быть очень экономичным, чтобы обеспечивать длительное время и дистанцию патрулирования при большой массе полезного груза;
- система управления движением должна обеспечивать комфортные условия экипажу и пассажирам, а также условия функционирования расположенному на борту приборному комплексу;
- система измерения параметров движения должна обеспечивать целостность навигационной информации при отказах отдельных измерителей;

- система управления движением должна обеспечивать приемлемые характеристики управляемости и устойчивости при ручном управлении, должна обеспечить информацию о повышенных деформациях корпуса из-за локальных больших нагрузок.

Для выполнения всех перечисленных задач нами разработан целый ряд математических моделей различной степени сложности. Наиболее значимой для нас является модель продольного движения экраноплана отражающая основную специфику действия экранного эффекта.

3. Результаты виртуальной продувки

Разработана математическая модель аэродинамики объекта, основанная на результатах исследования возникающих аэродинамических сил и моментов, приложенных к экраноплану в зоне действия экранного эффекта, полученная с использованием программного пакета CFD «Comsol Multiphysics» (результаты моделирования представлены на рис. 1 и 2).

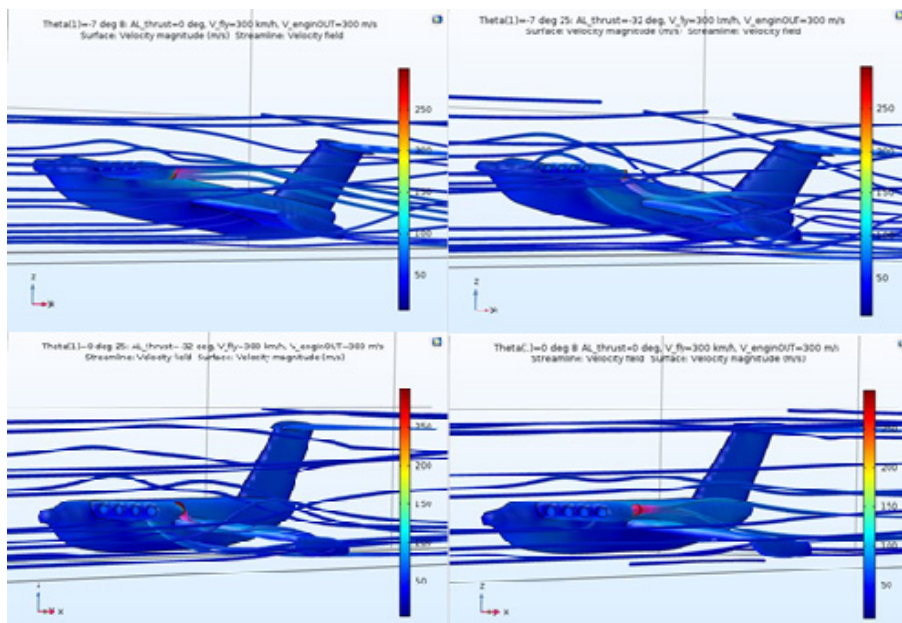


Рис. 1. Результаты моделирования при параметрах: тангаж 7 град., угол наклона тяги 0 и 32 град., тангаж 0 град., угол наклона тяги 0 и 32 град.

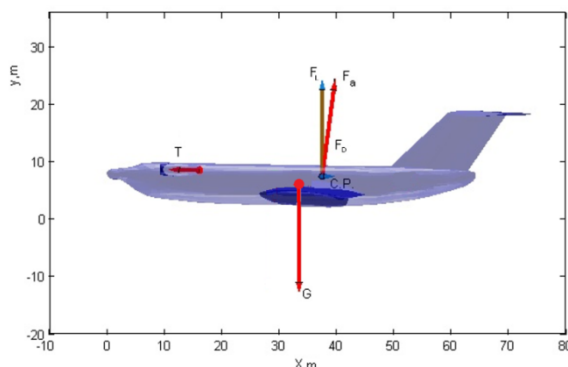


Рис. 2. Сила тяги T , сила тяжести G , подъемная сила FL , сила лобового сопротивления FD и их точки приложения.

Особенностями математической модели аэродинамики объекта являются:

- выбор системы координат и параметров, определяющих положение объекта;
- способы построения геометрии объекта, адаптированной для численного моделирования;
- особенности выбора модели аэродинамики при разных режимах движения объекта;
- изменяемая геометрия аэродинамических управляемых поверхностей, возможности изменения скорости и направления реактивных газовых струй;
- оптимизация последовательности вычислительных экспериментов, обход точек плохой сходимости решения задач в CFD;
- неравномерная сетка изменяемых параметров вектора состояния объекта и вопросы многомерной интерполяции результатов численного эксперимента - рассчитанных сил и моментов.

Используется математическая модель динамики объекта в системе координат «виртуальной продувки» с учетом действия реактивной тяги и аэродинамических сил и моментов для следующих целей:

- определение оптимального положения центра масс объекта для обеспечения балансировки на максимальном диапазоне изменения параметров движения (высота и скорость) с учетом ограничений на диапазоны изменения параметров управляющих воздействий;
- определение оптимальных значений параметров скорости и направления реактивной тяги, обеспечивающих балансировку при минимальном отклонении закрылков и нейтральном положении руля высоты на всем диапазоне параметров движения с учетом оптимальной центровки объекта;
- определение оптимальных значений параметров скорости и направления реактивной тяги, обеспечивающих балансировку на всем допустимом диапазоне отклонений закрылков.

5. Интерактивное управление

Предлагаемая постановка целей и задач определения нелинейного оптимального управления подвижным объектом, переводящего систему из одного стабильного состояния балансировки в любое другое стабильное состояние на всем допустимом диапазоном изменения параметров движения в зоне действия экранного эффекта позволяет:

- решать задачу детерминированного управления и стабилизации;
- осуществлять расчет оптимальных параметров управляющих воздействий, обеспечивающих сетку приращений сил и моментов в окрестностях заданных точек балансировки;
- проводить численное исследование траекторий полета с учетом внешних возмущений, неопределенностей параметров модели объекта и системы управления, вызванных интерполяцией рассчитанных балансирующих параметров, а также с учетом неточностей и запаздывания исполнения команд органами управления.

Разрабатываемые нами методы синтеза САУД затрагивают все режимы взлета, посадки и полета экраноплана. Полученные модели и законы управления позволяют соз-

дать симулятор управляемого движения экранопланом, с функциями пилотажного тренажера.

На основе симулятора предполагается создать систему краткосрочного предиктивного интерактивного управления в ускоренном времени. Аппаратная реализация этой системы в составе системы отображения информации САУД предполагает допустимую редукцию модели системы и законов управления.

Система анализирует действия пилота по его воздействию на классические, самолетные органы ручного управления, определяет параметры вероятной запланированной траектории движения на период прогнозирования, вычисляет параметры ближайшей допустимой траектории, переводящий экраноплан из балансировочного безопасного режима соответствующего, текущему состоянию в запланированный, и отображает ее и границы всей серии допустимых траекторий на дисплее.

6. Заключение

В ходе проведенных исследований были получены следующие результаты.

- Реализована математическая модель аэродинамики обобщенного (гипотетического) летательного аппарата заданной геометрии в программном пакете CFD «Comsol Multiphysics». Получена серия численных стационарных решений аэродинамических течений для заданных диапазонов изменения параметров полета и заданных диапазонов управляемых переменных модели аэродинамики объекта, позволяющая сформировать многомерный массив аэродинамических параметров модели.
- Получена и реализована математическая модель динамики объекта управления, позволяющая решать задачи балансировки и оптимальной центровки объекта управления.
- Решены задачи определения оптимального положения центра тяжести модели объекта, обеспечивающего возможность балансировки на максимальных диапазонах изменения параметров движения объекта в зоне экранного эффекта при минимальном отклонении органов управления соответствующему максимальному аэродинамическому качеству.
- Решены задачи условной оптимизации значений параметров управления, соответствующие точкам балансировки как решения задачи математического программирования при ограничениях на управляемые переменные, соответствующие диапазонам изменения параметров органов управления.
- Получены оптимальные физически реализуемые законы изменения параметров управления, соответствующие безопасным маневрам летательного аппарата в области действия экранного эффекта.
- Решены задачи стабилизации движения летательного аппарата в стационарных точках, а также задачи финитного управления и стабилизации движения крыльцевого объекта, как задача оптимального перехода от одного устойчивого состояния к другому с оптимальной стабилизацией отклонений от выбранной траектории в пространстве состояний.

Полученные решения сохранены в виде многомерных массивов параметров соответствующих разработанной структуре системы управления.

Методы и алгоритмы, разработанные для решения поставленных задач, легли в основу создаваемого программного комплекса, предназначенного для решения практических задач проектирования системы управления летательным аппаратом произвольной конструкции в зоне действия экранного эффекта с учетом неопределенностей парамет-

ров математической модели, а также с учетом неточностей и запаздывания исполнения команд органами управления.

В рамках проектирования приборного комплекса мы занимались проектированием безынерционных датчиков низкой высоты, в будущем математические модели датчиков и приводов будут учитываться при моделировании и синтезе САУД.

Исследования проведены при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект No. 18-08-00234) и, частично Российского научного фонда (проект No 19-19-00103).

Список литературы

1. Nebylov A., Watson J. (editors). Aerospace Navigation Systems. Wiley, 2016. 371 p.
2. Nebylov A.V, Wilson Ph.. Ekranoplane - Controlled Flight close to Sea. Monograph. WIT- Press / Computational Mechanics Publications. Southampton, UK, 2001. 300 p.
3. Nebylov A., Watson J., (editors). Aerospace Navigation Systems./John Wiley & Sons, Inc., 2016. 420 p.
4. Nebylov A.V. Structural optimization of motion control system close to the rough sea // IFAC Proceedings Volumes. 1996. Vol. 29, No. 1. P. 8071-8076.
5. Nebylov A.V. Ensuring control accuracy. Heidelberg: Springer, 2004.
6. Nebylov A.V. (editor). Aerospace Sensors. Momentum Press. NY, USA, 2013. 350 p.
7. Hahn T. et al. Analysis of Wing-in-Ground-Effect Vehicle with Regard to Safety Ensuring Control // IFAC Proceedings Volumes. 2014. Vol. 47, No. 3. P. 863-868.
8. Nebylov A.V., Nebylov. V.A. Controlled WIG flight concept // IFAC Proceedings Volumes. 2014. Vol. 47, No. 3. P. 900-905.
9. Knyazhsky, A.Y., Nebylov, A.V., Nebylov, V.A. Increase in the aerodynamic quality of ground effect vehicle due to the big waves turning around // Cybernetics and Physics. 2017. Vol. 6, No. 2. P. 71-75.
10. Benzerrouk H., Nebylov A., Nebylov V. Interactive Multiple Model Target Tracking Based on Seventh-Degree Spherical Simplex-Radial Cubature Information Filter // IFAC-PapersOnLine. 2018. Vol. 51, No. 12. P. 32-37.
11. Nebylov A.V., Nebylov V.A. Metrology problems of WIG-craft motion control // 5th International Workshop of Metrology in Aerospace (MetroAeroSpace). 2018, Rome, Italy.