

# АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

---

---

## ДИНАМИКА, БАЛЛИСТИКА, УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

---

---

УДК 681.5.01, 681.514

DOI:10.34759/vst-2020-3-7-22

### УПРАВЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЕМ И ДВИЖЕНИЕМ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ПОСАДКИ: АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР

Погосян М.А.<sup>1</sup>, Верейкин А.А.<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup> *Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),  
МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, 125993, Россия*

<sup>2</sup> *«Компания «Сухой»,  
ул. Поликарпова, 23А, Москва, 125284, Россия*

*\* e-mail: aautres@gmail.com*

Статья поступила в редакцию 08.06.2020

---

Автоматическое управление положением и движением (далее — автоматическое управление) летательных аппаратов (ЛА) на этапе посадки является одной из основных проблемных областей разработки систем автоматической посадки (САП) ЛА. Представлен обзор литературы, посвящённой вопросам автоматического управления ЛА на этапе посадки. Выявлены основные проблемные области, изучению которых посвящены найденные источники информации. Проанализированы технические решения, предлагаемые в рамках выделенных проблемных областей, выявлены их преимущества и недостатки. Представлены основные тенденции развития САП ЛА в части управления их положением и движением, предложены рекомендации по их построению.

*Ключевые слова:* летательный аппарат, беспилотный летательный аппарат, автоматическая посадка, управление положением и движением летательного аппарата, система автоматической посадки.

---

#### Введение

Из результатов, представленных в [1], можно сделать вывод о том, что основные технические характеристики САП пилотируемых и беспилотных ЛА являются производными от характеристик применяемых систем информационного обеспечения и систем автоматического управления их положением и движением. В настоящей статье представлен аналитический обзор литературы, посвящённой вопросам автоматического управления ЛА на этапе посадки. Работы, в соответствии с принадлежностью к проблемным областям, могут быть классифицированы следующим образом:

- архитектура САП [2, 3];
- синтез алгоритмов автоматического управления [2, 4–6, 8–16];
- нечёткое управление [17–21] (по сути, предлагается другой подход к синтезу алгоритмов автоматического управления, однако данную проблемную область целесообразно рассматривать самостоятельно в силу принципиальных отличий в понятийном и математическом аппаратах в сравнении с используемыми в рамках классической теории автоматического управления);
- оптимизация процесса автоматической посадки [7, 22];
- математическое моделирование процесса автоматической посадки [4, 23–31].

Проведённый анализ литературных источников показал, что эти исследования посвящены, главным образом, какой-либо достаточно узкой проблемной области, например, вопросам статистического математического моделирования автоматической посадки (АПос) [4, 23–28] или применению нейросетевых регуляторов для автоматического управления ЛА в процессе АПос [17–21]. Существенная часть работ посвящена вопросам исследования и разработки САП конкретного ЛА [2, 3, 8–13, 17–19, 22, 29, 30]. Налицо дефицит обзорно-аналитических работ, комплексно рассматривающих проблему формирования автоматического управления ЛА в процессе совершения им посадки.

Таким образом, исследование вопросов управления положением и движением ЛА в пространстве, актуальных для САП пилотируемых и беспилотных ЛА, выявление основных проблем, стоящих на пути создания САП ЛА в части управления положением и движением последних, и предпочтительных технических решений, которые могут быть использованы при создании САП ЛА, являются актуальными задачами и составляют цель настоящей работы.

Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены следующие задачи:

1. Проведены поиск информации по вопросам формирования управления ЛА в процессе АПос в научно-технической литературе и других открытых источниках, её анализ, систематический обзор.
2. Выявлены основные проблемные области, изучению которых посвящены найденные источники информации.
3. Проанализированы технические решения, предлагаемые в рамках выделенных проблемных областей, выявлены их преимущества и недостатки.

4. Исходя из полученных результатов и опыта реализации САП перспективного беспилотного летательного аппарата (БЛА), определены перспективы развития САП ЛА.

В разделе 1 выделены две группы способов формирования управления ЛА в процессе совершения им АПос. В разделе 2 рассмотрены работы, посвящённые вопросам управления ЛА в процессе совершения им АПос. Работы сгруппированы в соответствии с принадлежностью к проблемным областям. В разделе 3 приведены результаты анализа рассмотренных работ, предложена технологическая база САП. Основное внимание при этом уделено проблемам, решению которых посвящены рассмотренные работы, и техническим решениям, разработанным с целью их преодоления.

### **1. Способы формирования управления летательным аппаратом в процессе автоматической посадки**

Можно выделить две группы способов управления ЛА в процессе АПос:

- синтез управляющих воздействий на основе непосредственного использования информации о векторе состояния объекта, формируемой средствами информационного обеспечения;
- синтез управляющих воздействий на основе предварительно обработанной информации, формируемой средствами информационного обеспечения.

Опыт создания САП ЛА гражданской авиации показал возможность обеспечения АПос с пробегом по взлётно-посадочной полосе (ВПП) за счёт использования для управления оценок отклонений (и скоростей их изменения) ЛА от заданной траектории. Непосредственное же использование для формирования управляющих воздействий информации наземных радиотехнических средств или глобальных навигационных систем (без функциональных дополнений) может обеспечить лишь автоматический заход на посадку до некоторой высоты принятия решения, что подтверждается опытом разработки ряда ЛА военного и гражданского назначений.

Практический интерес представляют способы формирования автоматического управления, относящиеся ко второй группе, поэтому предмет рассмотрения статьи будет ограничен ими.

## 2. Управление летательным аппаратом в процессе совершения им автоматической посадки: проблемные области

В настоящем разделе представлены краткие сведения, содержащиеся в найденных источниках информации по вопросам формирования управления ЛА в процессе АПос. При этом анализируемые источники информации сгруппированы в соответствии с затрагиваемой проблематикой. Работы, принадлежность которых к той или иной проблемной области не может быть однозначно установлена, отнесены к нескольким проблемным областям либо к той проблемной области, которая представляет большую ценность с точки зрения предмета изучения настоящей работы.

### 2.1. Архитектура системы автоматической посадки

В [2] определены и проанализированы основные этапы посадки ЛА, даны рекомендации по иерархической структуре систем автоматического управления ЛА классической аэродинамической компоновки (как минимум двухуровневая).

Исследование [3] направлено на создание САП для малого одномоторного ЛА Cirrus SR22 разработки Cirrus Aviation. Система нацелена на предотвращение авиационных катастроф, возникающих по двум причинам: в результате потери летчиком трудоспособности и в результате ошибок, допущенных в процессе предполётной заправки ЛА топливом.

Предлагаемая САП автоматически осуществляет выбор подходящей ВПП по ряду критериев (длина ВПП, удалённость, населённость местности – для экстренной посадки). Далее, в соответствии с имеющимися паттернами, формируется желаемая траектория движения ЛА. В процессе АПос последовательно выполняются следующие этапы: «Выбор пункта назначения», «Приведение ЛА в точку начала АПос», «Инициация процесса АПос по сигналу захвата точки начала АПос», «Выполнение заданного паттерна движения», «Выравнивание» и «Пробег по ВПП».

САП построена на основе трёхуровневой архитектуры: на верхнем уровне происходит выбор пункта назначения, исходя из заданных критериев, с учётом состояния двигателя и удалённости от текущего положения ЛА; на среднем уровне – планирование траектории; на нижнем уровне – реализация полёта по траектории.

### 2.2. Синтез алгоритмов автоматического управления

Существенный вклад в исследование САП ЛА вносят специалисты Московского института электромеханики и автоматики (МИЭА) [4–7]. Так, в статье [4] описан подход к синтезу алгоритмов автоматического управления самолётом ИЛ-96-300 в продольном канале управления на этапе выравнивания в процессе выполнения АПос. В соответствии с предложенным подходом реализованы два контура управления – замкнутый и разомкнутый. Первый обеспечивает выдерживание экспоненциальной траектории, задаваемой соотношением высоты полёта и вертикальной скорости. Второй же позволяет снизить коэффициенты замкнутого контура при компенсации внешних возмущений, обеспечивая тем самым устойчивость системы. Сумма сигналов замкнутого и разомкнутого контуров управления и сигнала компенсации порывов ветра представляет собой итоговый сигнал управления.

В [5] описаны алгоритмы автоматического управления движением ЛА в боковом канале управления при посадке. Процесс АПос в боковом канале разделён на два этапа: выход на заданную траекторию и её стабилизация. На каждом из этих этапов применён свой алгоритм формирования управляющего сигнала (заданного значения угла крена). В силу того, что для управления боковым движением ЛА используются данные о текущем значении углового отклонения от заданной траектории, формируемые радиотехнической системой информационного обеспечения, введён так называемый аттенуатор, изменяющий коэффициент усиления измеряемого сигнала в линии управления от 1 на высоте круга до 0.25 в момент приземления.

В статье [6] обоснованы преимущества АПос с заходом сверху глissады (без выхода на высоту круга [7]). Авторами предложен алгоритм захвата глissады, построенный на использовании текущих координат ЛА, формируемых в навигационном комплексе. Такой подход позволяет существенно расширить область функционирования САП за счёт того, что обеспечивается управление ЛА в области пространства, где приём сигналов радиотехнических средств информационного обеспечения АПос невозможен и требования к точности управления ЛА существенно снижены в силу большого удаления от точки приземления. Целью этого управления является обеспечение вывода ЛА в область пространства, где обеспечи-

вается приём сигналов радиотехнических систем информационного обеспечения АПос и, таким образом, появляется возможность осуществлять управление на основе этих сигналов.

В [8] рассматриваются вопросы разработки САП БЛА. Особое внимание авторы уделяют учёту экранного эффекта на финальных стадиях АПос. Предложено вводить поправки в безразмерную высоту полёта, которая представляет собой высоту полёта, отнесённую к средней аэродинамической хорде крыла, с целью компенсации экранного эффекта, так как на этапе «Выравнивание» аэродинамические коэффициенты представлены в виде функции безразмерной высоты полёта. Введение подобных поправок может быть рассмотрено, наряду с интегральными коррекциями, при разработке законов автоматического управления с целью обеспечения робастности САП. Проведённое в программном комплексе MATLAB математическое моделирование подтвердило предложенные технические решения.

В статье [9] изложены результаты исследования процесса посадки БЛА на ВПП носителя (до касания) в условиях качки. Найдена длина минимального пути возвращения БЛА на палубу для определения момента формирования команды на возвращение по условию достаточного запаса топлива. С целью увеличения точности посадки предложено производить расчёты параметров заданной траектории ЛА с некоторым упреждением на  $n$  шагов, что позволяет компенсировать запаздывание системы управления ЛА. В соответствии с предварительными оценками, предложенные технические решения позволят обеспечить посадку БЛА на палубу корабля с ошибкой не более 0.1 м (при погрешности измерения фазы качки до  $10^\circ$  и амплитуды — до 10%) в условиях качки до 4—5 баллов.

Показана система автоматических взлёта и посадки БЛА [10], представляющего собой масштабную модель самолёта Cessna 172, снабжённую посадочным гаком. В соответствии со сценарием моделирования взлёт осуществляется с ВПП, в то время как посадка происходит на взлётно-посадочную площадку размером  $12 \times 8$  м, имитирующую палубу носителя, снабжённую аэрофинишёром. Отклонение от расчётной точки касания БЛА в боковом направлении не должно превышать 4 м, а в продольном — лежать в пределах от  $-0.24$  м до  $0.52$  м. В качестве средств обеспечения навигационной информацией используется инерциальная навигационная система, корректируемая посредством D-GPS.

Данная работа интересна прежде всего тем, что в ней представлено применение адаптивного регулятора в продольном и боковом каналах управления, в состав которого включен предиктор изменения (первой производной) выходного сигнала. Это позволяет системе управления адекватно реагировать в случае изменения скорости БЛА в процессе приземления (предложенные авторами линейные модели рассчитаны на детерминированное значение посадочной скорости). Представлен закон автоматического управления тягой двигателя с интегратором, позволяющим компенсировать высокое значение постоянной времени электродвигателя привода винта самолёта. Также обеспечено управление углом ориентации передней опоры шасси на основе пропорционально-дифференциального регулятора, что, как показал эксперимент, позволило добиться бокового отклонения от оси ВПП менее 4 м при взлёте.

Разработан экспериментальный стенд имитационного моделирования процессов взлёта и посадки. Он базируется на системе X-Plane Simulator, позволяющей визуализировать процесс испытаний, среде моделирования, реализованной на базе программного комплекса MATLAB, и компьютере управления полётом. Обмен данными между элементами стенда происходит по протоколу UDP. В соответствии с представленными результатами экспериментов боковое отклонение от оси взлётно-посадочной площадки не превысило 2 м, а продольное отклонение от расчётной точки приземления — не превысило 0.1 м.

В работах [11, 12] предложено положить в основу САП следующие технологии: модифицированный наблюдатель Люенбергера, робастную систему автоматического приземления, многоуровневую архитектуру САП. Применение разработанных технологий позволит обеспечить заданные точностные характеристики САП в части допустимых значений параметров состояния ЛА в момент приземления на ВПП, а также совершение автоматической посадки в условиях деградации наземных и бортовых средств информационного обеспечения.

В [13] рассмотрена трёхуровневая САП БЛА, включающая в свой состав фильтр Калмана с постоянными (для снижения нагрузки на бортовой вычислитель) коэффициентами матрицы поправок. В фильтре Калмана осуществляется оценка угла наклона траектории, а также угла и скорости ветра. Результаты математического моделирования показали повышение эффективности



закона управления с введением в него учёта угла ветра.

Управление БЛА роторного типа без использования сигнала GPS описано в [14]. В качестве средств информационного обеспечения АПос авторы предлагают использовать инерциальную навигационную систему и систему технического зрения. Измеряя с помощью последней пройденное расстояние, можно определить текущее положение БЛА на цифровой карте местности, в качестве которой предлагается использовать Google Earth.

Фильтр Калмана используется для вычисления навигационных погрешностей инерциальной навигационной системы. Байесовский фильтр определяет положение БЛА в абсолютной системе координат в горизонтальной плоскости, используя совместно визуальное измерение пройденного расстояния и цифровую карту местности. Данные о пространственном положении ЛА, используемые в процессе вычислений фильтром Калмана, определяются за счёт совместной обработки информации с выхода байесовского фильтра и данных барометрического высотомера. В ходе лётных испытаний предложенная система управления, установленная на БЛА Yamaha R-MAX, продемонстрировала свою работоспособность.

В [2] показан процесс синтеза законов автоматического управления ЛА в продольном и поперечном каналах. В работе использовался характерный для гражданской авиации подход, предусматривающий устранение углов сноса и крена незадолго перед приземлением (начиная с высоты 5 м). С целью оценки синтезированных законов управления проведены экспериментальные исследования на математической модели пространственного движения самолёта-амфибии Бе-200 в условиях воздействия ветровых возмущений.

Работы [15, 16] посвящены вопросам формирования и реализации желаемой траектории АПос пассажирского самолёта. Существенной особенностью данных работ является то, что желаемая траектория сформирована таким образом, чтобы обеспечить пилоту наиболее комфортные условия работы в случае вынужденного перехода из режима автоматического управления в режим ручного управления (авторы называют данный подход антропоцентрическим). При выборе желаемой траектории автоматического выхода на глиссаду пилот рассматривается как оптимальный регулятор, реализовавший оптимальную траекторию вы-

хода на глиссаду. Выбор производится на основе предварительного анализа траекторий удачных реализаций данным пилотом выхода на глиссаду. Выбор высоты начала выравнивания реализован таким образом, чтобы обеспечить наибольшее допустимое значение ошибки её оценки пилотом.

### 2.3. Нечёткое управление

При описании сложных систем, полнотой информации о которых разработчик не обладает, целесообразно рассматривать возможность применения методов нечёткой логики. Нечёткое управление обеспечивает управляемому объекту свойство адаптивности к изменяющимся внешним условиям. Рассмотренные в настоящем разделе исследования посвящены вопросам нечёткого управления применительно к САП ЛА.

В [17] сопоставлены результаты математического моделирования в программном комплексе MATLAB работы двух нечётких (Mamdani-type fuzzy inference system и Sugeno-type fuzzy inference system) и одного нейро-нечёткого (ANFIS – adaptive neuro-fuzzy inference system) регуляторов применительно к решению задачи АПос ЛА.

Процесс разработки нечёткого регулятора для решения задачи автоматического управления ЛА в продольном канале на этапе посадки описан в статье [18]. Результаты математического моделирования, полученные в программном комплексе MATLAB, и результаты натурных работ позволили авторам сделать вывод о более высоком качестве результатов управления в сравнении с таковыми для традиционных регуляторов. Необходимо отметить, что результаты и критерии сравнения оставлены авторами за рамками данной статьи.

Работа [19] интересна подходом к выбору значений параметров регулятора (последовательно адаптируемой нечёткой логической системы) на основе генетического алгоритма.

В [20] предложена нейросетевая реализация регуляторов в канале управления положением руля высоты и канале управления тягой двигателя БЛА. В первом случае использование нейросетевого регулятора обеспечивает безопасный «гладкий» переход между законами управления (различают два закона управления, один из которых соответствует вертикальному отклонению от заданной траектории более 10 м, а другой – менее 10 м). Во втором случае введение нейросетевого регулятора обеспечивает лучшую реакцию системы на воздействие нестационарных внешних условий в сравнении с методом интерполяционно-

го получения выходных сигналов по внешним воздействиям и сигналам управления.

В статье [21] описана методика разработки системы управления с нечётким логическим регулятором. В качестве примера применения предложенной методики разработан канал системы управления двигателем БЛА.

#### **2.4. Оптимизация процесса автоматической посадки**

В статье [7] рассматривается способ совершенствования АПос без выхода на высоту круга. Данный способ обеспечивает более широкую область включения режима посадки при нахождении ЛА как выше, так и ниже глассады, а также сокращение времени пребывания ЛА в воздушном пространстве аэродрома, что увеличивает его пропускную способность и оказывает положительное влияние на экологическую обстановку в районе аэродрома. Посадка такого типа при нахождении ЛА выше глассады происходит со снижением ЛА с максимально допустимой вертикальной скоростью, выходом на глассаду и стабилизацией на ней. Представлены результаты математического моделирования АПос для ЛА ТУ-204, приведены методы оценки соответствия САП заявленным характеристикам.

Статья [22] посвящена вопросам оптимального управления ЛА в процессе захода на посадку. Предложено закон регулирования рассматривать как сумму сигнала оптимального управления номинальным объектом и сигнала компенсации неопределенностей в исходном объекте. Численное моделирование показало хорошую робастность алгоритмов управления по отношению к задаваемым параметрическим возмущениям.

#### **2.5. Математическое моделирование процесса автоматической посадки**

Большой вклад в проработку вопросов автоматического управления и математического моделирования движения ЛА на этапе посадки вносят специалисты ЦАГИ им. проф. Н.Е. Жуковского [23—27]. В исследовании [23] предложена методика моделирования наихудших реализаций АПос при воздействии случайных факторов, соответствующих вероятностям  $10^{-5}$ — $10^{-7}$  получения предельных отклонений параметров траектории ЛА от заданной. В качестве случайного фактора используется продольный порыв ветра, а в качестве параметров траектории ЛА — вертикальная скорость и дальность полёта. Работы [24—27] являются развитием данного направления исследова-

ний. Применение предложенных методик и подходов позволяет обосновать сокращение количества моделируемых случаев, заданных сертификационными требованиями CS-AWO (ED Decision 2003/006/RM), что может оказать существенное влияние на сроки проведения сертификационных мероприятий.

В [28] на примере задачи оценки безопасности АПос самолётов по категории III ICAO методом статистического моделирования рассмотрены особенности работы с большими выборками ( $n = 10^5 \div 10^6$ ).

Большое внимание в [4] уделено вопросам математического моделирования, обоснована необходимость реализации детерминированного и статистического видов моделирования. Целью детерминированного математического моделирования является формирование законов автоматического управления ЛА в процессе посадки при воздействии детерминированных возмущений, определяющих, по сути, границы зоны допустимой эксплуатации САП, целью же статистического — подтверждение обеспечения соответствия характеристик точности управления ЛА заданным значениям в условиях воздействия ряда случайных факторов (ветровых возмущений, неустойчивости характеристик средств информационного обеспечения АПос и т.п.).

Здесь же приведено описание методики математического моделирования, проводимого в обеспечение сертификации САП самолёта ИЛ-96-300 по категории IIIA ICAO. В рамках моделирования предусмотрен учёт следующих переменных факторов: посадочной массы, центровки, ветровых возмущений, скорости захода на посадку, углов наклона глассады, температуры окружающего воздуха, уклона ВПП, отказа одного двигателя. Дополнительно предусмотрена оценка характеристик приземления на ВПП типа «HILLTOP» и на ВПП, расположенную на «дамбе».

В [29] описан комплекс имитационного моделирования САП, разработанный в программном комплексе MATLAB, позволяющий проводить экспериментальные исследования с целью оценки эксплуатационных характеристик системы и отличающийся возможностью бесступенчатого автоматизированного перехода от математических моделей к программному коду. Последнее его качество обеспечивается применением концепции модельно-ориентированного проектирования САП.

В [30] представлены методика и результаты экспериментальных и имитационных исследова-

ний АПос БЛА в продольном канале при условии наличия априорной информации о параметрах места посадки. В качестве контролируемых параметров были выбраны рассогласование между заданной и измеренной высотами полёта БЛА, а также амплитуда и частота собственных колебаний замкнутой системы управления БЛА.

### 3. Анализ рассмотренных работ

Разработкам САП как пилотируемых, так и беспилотных ЛА уделяется повышенное внимание. К настоящему времени создан ряд систем, обладающих удовлетворительными техническими характеристиками. Однако на пути дальнейшего совершенствования САП встают, с одной стороны, несовершенство используемых средств информационного обеспечения, а с другой – недостатки алгоритмов управления ЛА (включая обработку информации, на основе которой обеспечивается управление).

#### 3.1. Работы, посвящённые проблемам архитектуры системы автоматической посадки

Авария самолёта В-747 при посадке на аэродроме Бишкека 16 января 2017 г. [31] показала, что переход на ручное управление из автоматического режима в непосредственной близости от земной поверхности сопряжён с высокими рисками, в силу того, что процесс «включения» экипажа в контур управления имеет некоторую динамику, определяемую, в том числе, сложностью ситуации, в которой приходится осуществлять «включение», а также лётным опытом экипажа.

В качестве решения проблем данного класса может быть предложена многоуровневая архитектура САП с анализом полетной ситуации, управлением режимами посадки и сигнализацией экипажу на верхнем уровне управления. Основной принцип организации САП должен состоять в том, что локализация последствий деградации ресурсов осуществляется на том уровне и в тех подсистемах, где они произошли, за счет использования функциональных и аппаратных резервов, при исчерпании которых решение передается на более высокий уровень управления.

За счёт своевременной сигнализации экипажу при исчерпании ресурсов автоматического управления многоуровневая архитектура САП позволит повысить уровень безопасности полёта.

Ещё одна проблема, решаемая введением многоуровневой архитектуры САП, – исключение возможности перегрузки экипажа ЛА несуще-

ственными данными, что в целом лежит в русле рекомендаций Руководства по всепогодным полётам ICAO.

#### 3.2. Работы, посвящённые проблемам синтеза алгоритмов автоматического управления

В основе современных САП лежат достижения теории автоматического управления, теории фильтрации и комплексирования информации [32, 33]. Применяются теорема «разделения» [34], позволяющая обеспечить разделение процессов синтеза наблюдателя и регулятора, а также хорошо известные фильтр Калмана [35, 36] и наблюдатель Люенбергера [37, 38].

При разработке САП целесообразно рассматривать возможность резервирования информации. Особенное значение резервирование имеет для БЛА, которые при отсутствии связи с наземным экипажем и выходе из строя источников информационного обеспечения АПос не способны выполнить штатную посадку.

Однако в ряде случаев разработчики кладут в основу САП принцип использования одного внешнего источника информационного обеспечения. Так, в работе [39] предложена система автоматического управления БЛА, реализующая все процессы управления, начиная от выруливания на ВПП и заканчивая АПос. В качестве средства информационного обеспечения использован один приёмник сигналов GPS (используется система дифференциальной коррекции D-GPS) и приёмник воздушного давления для определения воздушной скорости ЛА. Это сделано для того, чтобы показать высокие потенциальные возможности применения глобальной спутниковой навигационной системы для определения положения ЛА. Предложенные авторами подходы подтверждены результатами экспериментов.

Использование спутниковых навигационных систем в качестве единственного внешнего источника информационного обеспечения АПос несёт в себе определённые риски. Так, в случае ведения масштабных боевых действий спутниковые навигационные системы могут стать недоступными.

В некоторых случаях, как, например, в [3] или при разработке САП для самолёта Superjet, предложено формировать параметры положения и движения ЛА относительно траектории посадки с использованием измеренной дальности ЛА от ВПП, что осложняется в силу относительно высоких значений погрешностей измерения дальности (особенно на значительных удалениях от

ВПП). Выходом из данной ситуации является исключение из алгоритмов управления измеряемой дальности.

Существенной проблемой является компенсация влияния ветровых возмущений на параметры положения ЛА относительно заданной траектории. Одним из вариантов решения этой проблемы является организация двух контуров управления – замкнутого и разомкнутого, где разомкнутый предназначен для снижения коэффициентов усиления замкнутого контура с целью обеспечения устойчивого управления. Вторым возможным вариантом решения проблемы является оценка и учёт параметров ветровых возмущений при формировании управляющих воздействий.

В силу того, что АПос может быть начата с существенными (до нескольких км) отклонениями ЛА от заданной траектории в горизонтальной плоскости, возникает проблема обеспечения, с одной стороны, приемлемого времени выхода на заданную траекторию, а с другой – точного управления вблизи неё. В качестве решения этой проблемы предлагаются два алгоритма автоматического управления в горизонтальной плоскости, один из которых функционирует на существенных удалениях от заданной траектории, а другой – в некоторой её окрестности. С точки зрения простоты реализации предпочтителен единый алгоритм автоматического управления в боковом канале. При построении такого алгоритма можно рассмотреть вариант применения интегральных коррекций.

Радиотехнические инструментальные средства информационного обеспечения АПос (ILS, MLS) измеряют угловое отклонение ЛА от заданной траектории в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Однако использование угловых отклонений для формирования управляющих воздействий приводит к необходимости изменения коэффициентов усиления в законах управления. Это происходит в силу того, что одному и тому же значению углового отклонения ЛА от заданной траектории соответствуют различные значения линейных отклонений при изменении удаления ЛА от глиссадного и курсового радиомаяков. Таким образом, предпочтительно осуществлять управление на основе линейных отклонений ЛА от заданной траектории.

Могут быть использованы адаптивные регуляторы в продольном и боковом каналах управления с предикторами изменения выходного сигнала. С другой стороны, можно использовать для

управления не только отклонения ЛА от заданной траектории, но и их первые производные.

С учётом того, что осуществление АПос без выхода на высоту круга имеет определённые преимущества, алгоритм формирования разовой команды «Захват глиссады» должен быть работоспособен при заходе как снизу, так и сверху глиссады, учитывать динамические характеристики ЛА, не приводить к перерегулированию.

Отдельной проблемой является управление ЛА в продольном канале на небольших высотах относительно ВПП, на которых проявляется влияние экранного эффекта. Из практики известно, что некорректный учёт экранного эффекта в алгоритмах автоматического управления может привести к нарушению ограничений, накладываемых на положение точки приземления, измеряемой вдоль продольной оси ВПП. Обеспечение САП свойства робастности позволяет решить данную проблему.

Принятый в гражданской авиации подход, предусматривающий устранение углов сноса и крена перед приземлением, хорошо сказывается на параметрах движения ЛА в момент приземления, комфорте экипажа и пассажиров, износе пневматиков, одновременно приводя к ухудшению точности посадки. Для ЛА военного назначения, характеризующихся высокими прочностными свойствами шасси, целесообразно рассмотреть возможность отказа от устранения углов сноса и крена в пользу увеличения точности посадки.

При АПос на палубу авианесущего корабля, когда требования точности посадки превалируют над требованиями выдерживания заданной вертикальной скорости в момент приземления, общепринятым является исключение не только устранения углов сноса и крена, но и этапа выравнивания, предусматривающего снижение модуля вертикальной скорости ЛА со значения, соответствующего снижению ЛА по глиссаде, до значения, заданного для момента приземления ЛА.

### ***3.3. Работы, посвящённые проблемам нечёткого управления летательным аппаратом в процессе автоматической посадки***

Большой и интенсивно развивающийся класс систем автоматического управления представляют собой системы, построенные на принципах нечёткой логики. Это может быть объяснено высоким уровнем сложности построения подробных нелинейных математических моделей процессов,



сопровождающих процесс АПос. В настоящее время внедрение алгоритмов автоматического управления, построенных на принципах нечёткой логики, встречает затруднения как организационного плана: не отработаны подходы к сертификации систем автоматического управления такого типа, так и технического плана: вопросы быстродействия, необходимость обучения системы на специально подготовленных примерах и т.д. Затруднения технического плана связаны, главным образом, с тем, что к настоящему моменту эта область знания далека от своего завершения, не до конца определены области предпочтительного применения искусственного интеллекта, не в полной мере завершено формирование принципов его разработки.

Так, в [40] определены слабые места глубокого обучения, которые объясняются особенностью нейросетей, использующих восходящий подход, — невозможно заложить в них какую-либо конкретную генерализованную формульную зависимость. Вместо этого приходится обучать нейросеть на специально подготовленных примерах. Более того, в дальнейшем, после завершения процесса начального обучения, исследователь не может определить полученную в системе генерализованную формульную зависимость (т.к. результат обучения представляет собой матрицы коэффициентов) и даже не всегда способен объяснить полученные результаты. Одним из вариантов решения данных проблем может быть переход к гибридным системам искусственного интеллекта, использующим как восходящий, так и нисходящий подходы.

### **3.4. Работы, посвящённые проблемам оптимизации процесса автоматической посадки**

Можно выделить два направления оптимизации процесса АПос: оптимизация сценария АПос и оптимизация управления ЛА в процессе АПос. Первое направление связано с минимизацией времени нахождения ЛА в районе аэродрома посадки с целью повышения топливной экономичности, снижения уровня шума и т.п. Второе направление связано с оптимизацией управления ЛА на этапе АПос и широко раскрыто в работах, посвящённых оптимальному управлению техническими системами.

С точки зрения минимизации времени нахождения ЛА в районе аэродрома посадки возможным решением является осуществление АПос без выхода на высоту круга, для обеспечения чего САП

должна быть работоспособна как при заходе снизу глиссады, так и при заходе сверху неё, на обеспечение чего, в свою очередь, нацелен алгоритм формирования разовой команды «Захват глиссады», упоминавшийся выше.

### **3.5. Работы, посвящённые проблемам математического моделирования процесса автоматической посадки**

При разработке САП целесообразно применять детерминированное и статистическое математическое моделирование. Первое призвано обеспечить формирование законов автоматического управления ЛА в процессе посадки при воздействии детерминированных возмущений, определяющих границы зоны допустимой эксплуатации САП, второе — подтвердить выполнение заданных характеристик точности управления ЛА в условиях воздействия случайных факторов (погрешностей средств информационного обеспечения, ветровых возмущений, изменений температуры воздуха и т.п.). Снизить требуемые объёмы статистического моделирования можно за счёт применения методов теории вероятностей.

Многие разработчики в качестве основы для разработки инструментальных средств математического моделирования выбирают программные комплексы MATLAB, ANSYS SCADe, SimInTech и др., реализующие концепцию модельно-ориентированного проектирования систем автоматического управления, которая обеспечивает автоматизацию перехода от математических моделей алгоритмов автоматического управления к программному коду, используемому бортовыми вычислительными средствами.

Неточности, допущенные при создании математических моделей кинематики и динамики ЛА, используемых при разработке алгоритмов автоматического управления, могут оказать существенное влияние на качество процессов управления. Одним из примеров ошибок, допущенных при разработке математических моделей, является некорректный учёт экранного эффекта, что, как показывает опыт, может привести к нарушению ограничений приземления ЛА на ВПП в части длины зоны приземления. В свою очередь, приземление за пределами желаемой зоны приземления может привести к выкатыванию ЛА за пределы ВПП. Таким образом, САП должна обладать свойством робастности по отношению к недетерминированным внешним воздействиям.

### 3.6. Технологическая база САП

С учётом результатов, полученных в работе [1], результатов настоящей работы и опыта разработки САП перспективного БЛА, можно рекомендовать в качестве технологической базы САП использовать многоуровневую архитектуру, фильтр Калмана, наблюдатель Люенбергера, модельно-ориентированный способ проектирования систем автоматического управления. В качестве ядра информационного обеспечения АПос можно предложить инерциальную навигационную систему, корректируемую по информации, получаемой от спутниковой навигационной системы с функциональными дополнениями (дифференциальной навигацией) и радиотехнической навигационной системы в качестве резервного источника информации.

Функциональная схема САП, построенной на предложенных принципах, представлена на рисунке, где использованы следующие обозначения: ИНС – инерциальная навигационная система; РТС – радиотехническая система; СНС – спутниковая навигационная система; ФГ – формирователь глассады; ФД – функциональные дополнения. Красной рамкой выделены блоки, реализуемые в комплексной системе управления ЛА.

К верхнему уровню управления отнесены: экипаж; средства индикации, сигнализации, управления; формирователь индикации, сигнализации; блок анализа полетной ситуации, включающий блок контроля технического состояния элементов САП и блок контроля процесса АПос; блок управления режимами общего самолётовождения.

К уровню координации отнесены: блок управления режимами САП; наблюдатель посадки; формирователь траекторного управления.

К уровню исполнения отнесены: средства памяти (полетное задание) и формирования данных аэродрома посадки и управления бортовыми средствами посадки; исполнительные средства управления (автопилот, система рулевых приводов, силовая установка); датчики навигационной, посадочной, аэрометрической информации, радиовысотомер.

#### Выводы

Исследованы вопросы управления положением ЛА в пространстве, актуальные для САП пилотируемых и беспилотных ЛА, выявлены основные проблемы, стоящие на пути создания САП ЛА, и предпочтительные технические решения,

которые могут быть применены при создании САП ЛА.

При решении поставленных в настоящей работе задач в качестве методов исследования использована совокупность системных взаимосвязанных методических подходов, основанных на применении:

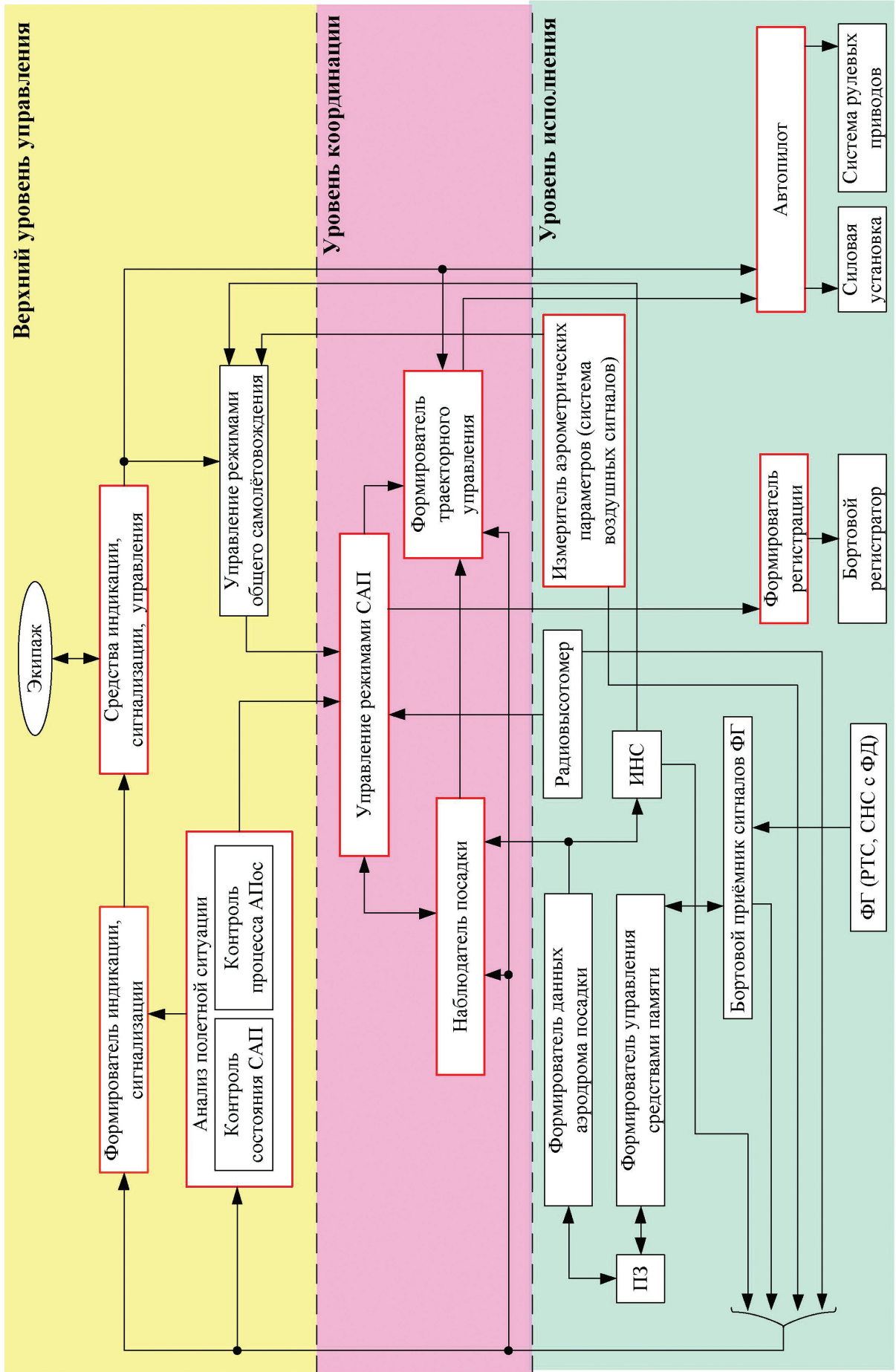
- поиска и анализа научно-технической литературы, её систематического обзора;
- анализа трендов с целью выявления доминирующих направлений развития САП в части информационного обеспечения и управления ЛА;
- элементов SWOT-анализа с целью выявления основных преимуществ и недостатков анализируемых объектов.

Проведённый поиск информации по вопросам формирования управления ЛА в процессе АПос в научно-технической литературе и других открытых источниках, её анализ и систематический обзор позволили выделить две группы способов управления ЛА в процессе АПос: синтез управляющих воздействий на основе непосредственного использования информации о векторе состояния объекта, формируемой средствами информационного обеспечения; синтез управляющих воздействий на основе предварительно обработанной информации, формируемой средствами информационного обеспечения.

Выявлены основные проблемные области, изучению которых посвящены найденные источники информации: архитектура САП, синтез алгоритмов автоматического управления, нечёткое управление, оптимизация процесса АПос, математическое моделирование процесса АПос. Проанализированы технические решения, предлагаемые в рамках выделенных проблемных областей, выявлены их преимущества и недостатки.

Предложена технологическая база САП. Разработана функциональная схема САП, построенной на предложенной технологической базе.

Систему автоматического управления ЛА в процессе выполнения им АПос можно рекомендовать строить на основе стабилизации заданной траектории полёта с использованием линейных отклонений от неё и, возможно, скоростей изменения этих отклонений. Такой подход позволит использовать постоянные коэффициенты усиления в отличие от переменных коэффициентов, применяемых в случае использования угловых отклонений. Кроме того, САП должна обеспечивать отсутствие необходимости вмешательства экипажа в процесс управления на малых высотах



Функциональная схема САП с трёхуровневой архитектурой

даже в случае деградации ресурсов управления (особенно критично для БЛА), быть работоспособной в условиях потери внешних источников информации.

Ближнесрочные перспективы развития САП связаны с классическими системами автоматического управления. Среднесрочные перспективы САП связаны с системами автоматического управления с элементами искусственного интеллекта. Долгосрочные перспективы САП связаны с интеллектуальными системами автоматического управления, способными осуществлять функционирование в недетерминированных условиях, включая деградацию ресурсов управления. Возможные направления развития САП показаны в Проекте дорожной карты развития систем управления БЛА [41].

### Библиографический список

1. *Верейкин А.А., Лернер И.И.* К вопросу фильтрации нестационарных процессов применительно к задачам автоматической посадки // Новые технологии, материалы и оборудование российской авиакосмической отрасли — АКТО-2016: Сборник докладов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием: в 2-х т. — Казань: Изд-во Академии наук Республики Татарстан, 2016. Т. 2. С. 404-409.
2. *Колесников А.А., Кобзев В.А., Никитин А.И.* Синергетический синтез законов векторного управления системы автоматической посадки самолёта // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2011. Т. 119. № 6. С. 125-139.
3. *Siegel D., Hansman R.J.* Development of an Autoland System for General Aviation Aircraft. Report No. ICAT-2011-09, September, 2011. MIT International Center for Air Transportation (ICAT), Department of Aeronautics & Astronautics, Massachusetts Institute of Technology. Cambridge, MA 02139 USA, 208 p.
4. *Мазур В.Н., Мельникова Е.А.* Автоматическое управление посадкой самолёта ИЛ-96-300 по категории IIIA // Труды ФГУП «НПЦАП». Системы и приборы управления. 2010. № 1. С. 44-53.
5. *Мазур В.Н., Мельникова Е.А.* Определение параметров алгоритма управления боковым движением тяжелого неманевренного самолета при автоматической посадке // Труды МИЭА. Навигация и управление летательными аппаратами. 2011. № 4. С. 48-61.
6. *Мазур В.Н., Хлгатын С.В., Скрипник Н.П.* Разработка алгоритма захвата глиссады, формируемого по координатам от навигационного комплекса при выполнении посадки «сверху» // Труды МИЭА. Навигация и управление летательными аппаратами. 2011. № 4. С. 74-83.
7. *Мазур В.Н., Хлгатын С.В.* Автоматическая посадка без выхода на высоту круга // Труды МИЭА. Навигация и управление летательными аппаратами. 2010. № 2. С. 17-29.
8. *Gonzalez P.J., Boschetti P.J., Cárdenas E.M., Rodriguez M.* Design of a Landing Control System which considers Dynamic Ground Effect for an Unmanned Airplane // 1st WSEAS International Conference on Aeronautical and Mechanical Engineering — AEME'13 (Vouliagmeni, Atenas, Grecia), pp. 143-148. URL: <http://www.wseas.us/e-library/conferences/2013/Vouliagmeni/MRME/MRME-21.pdf>
9. *Подоплёкин Ю.Ф., Толмачёв С.Г., Шаров С.Н.* Информационно-управляющая система приведения беспилотных летательных аппаратов на движущееся судно // Информационно-управляющие системы. 2012. № 3(58). С. 22-28.
10. *You D.I., Jung Y.D., Cho S.W., Shin H.M., Lee S.H., Shim D.H.* A Guidance and Control Law Design for Precision Automatic Take-off and Landing of Fixed-Wing UAVs // American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) Guidance, Navigation, and Control Conference (13-16 August 2012, Minneapolis, Minnesota), 19 p. DOI: 10.2514/6.2012-4674
11. *Лернер И.И., Верейкин А.А., Орехов М.И.* Технологии автоматической посадки для перспективных авиационных комплексов «ОКБ Сухого» // Навигация, наведение и управление летательными аппаратами: сборник тезисов Третьей Всероссийской Научно-технической конференции (21-22 сентября 2017, Москва, ГосНИИАС). — М.: Научтехлитиздат, 2017. Т. 1. С. 200-201.
12. *Верейкин А.А.* Система автоматической посадки для перспективных авиационных комплексов «ОКБ Сухого» // XXI Научно-техническая конференция молодых учёных и специалистов (30 октября — 3 ноября 2017, Королёв): Тезисы докладов. — Королёв: Изд-во РКК «Энергия» им. С.П. Королёва, 2017. Т. 1. С. 42-43.
13. *Биттер В.В., Михайлин Д.А.* Фильтр Калмана в системе автоматической посадки БЛА // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2009. Т. 7. № 7. С. 10-14.
14. *Conte G., Doherty P.* Vision-Based Unmanned Aerial Vehicle Navigation Using Geo-Referenced Information // EURASIP Journal on Advances in Signal Processing. 2009. Article no. 387308, 18 p. DOI: 10.1155/2009/387308
15. *Костюков В.М., Чинь В.Т., Нгуен Н.М.* Формирование желаемой траектории автоматической посадки пассажирского самолета на основе антропоцентрического принципа // Вестник Московского авиационного института. 2016. Т. 23. № 1. С. 123-135.
16. *Костюков В.М., Чинь В.Т., Нгуен Н.М.* Реализация алгоритма формирования желаемой траектории автоматической посадки пассажирского самолёта на основе антропоцентрического принципа // Вестник Московского авиационного института. 2016. Т. 23. № 3. С. 84-95.
17. *Lakovic E., Lotinac D.* Aircraft Landing Control Using Fuzzy Logic and Neural Network. 8 p. URL: <https://>



- pdfs.semanticscholar.org/9635/94433580c9350c05dd4e5daec60942e31056.pdf?\_ga=2.175876130.1085320079.1553197709-490411002.1553197709
18. *Raj K.D.S., Tattikota G.* Design of Fuzzy Logic Controller for Auto Landing Applications // International Journal of Scientific and Research Publications. 2013. Vol. 3. No. 5, 9 p. URL: <http://www.ijsrp.org/research-paper-0513/ijsrp-p1790.pdf>
  19. *Kashyap S.K., Gopalarathnam G.* Fuzzy Controller for Aircraft Auto-landing // UKIERI WORKSHOP (2-3 December 2010, IIT Bombay), 8 p.
  20. *Кузин А.В., Курмаков Д.В., Лукьянов А.В., Михайлин Д.А.* Нейросетевая реализация автоматического управления безопасной посадкой беспилотного летательного аппарата // Труды МАИ. 2013. № 70. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=44540>
  21. *Ульянов Г.Н., Иванов С.А., Владыко А.Г.* Модель канала управления беспилотного летательного аппарата с нечётким логическим контроллером // Информационно-управляющие системы. 2012. № 4. С. 70-73.
  22. *Фуртат И.Б.* Робастное субоптимальное управление боковым движением летательного аппарата в режиме захода на посадку // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 3(85). С. 51-55.
  23. *Кузьмин В.П., Ярошевский В.А.* Оценка предельных отклонений параметров траекторий самолёта при автоматической посадке // Ученые записки ЦАГИ. 1984. Т. XV. № 2. С. 43-56.
  24. *Кузьмин В.П., Парышева Г.В.* Определение статистических характеристик движения самолёта при автоматическом заходе на посадку // Ученые записки ЦАГИ. 1985. Т. XVI. № 6. С. 55-66.
  25. *Кузьмин В.П.* Оценки точности автоматического управления боковым движением самолёта при посадке // Ученые записки ЦАГИ. 1987. Т. XVIII. № 5. С. 65-69.
  26. *Кузьмин В.П.* Анализ возможных значений предельных отклонений параметров траектории самолёта при автоматической посадке // Ученые записки ЦАГИ. Т. XXIX. 1998. № 3-4. С. 134-143.
  27. *Кузнецов А.А., Кузьмин В.П.* Использование метода существенной выборки при моделировании автоматической посадки // Ученые записки ЦАГИ. 2004. Т. 35. № 3-4. С. 70-78.
  28. *Кузнецов А.Г., Александровская Л.Н.* Непараметрические методы «измерения» малых рисков в задачах оценки соответствия требований к безопасности автоматической посадки самолётов нормам лётной годности // Труды МИЭА. Навигация и управление летательными аппаратами. 2011. № 3. С. 2-11.
  29. *Верейкин А.А., Лернер И.И., Суматохин Д.В.* Некоторые особенности системы автоматических взлёта и посадки беспилотного летательного аппарата, работоспособной в условиях деградации информационных ресурсов // Новые технологии, материалы и оборудование российской авиакосмической отрасли — АКТО-2018: Сборник докладов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием (8-10 августа 2018). — Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2018. Т. 3. С. 63-69.
  30. *Шеваль В.В., Крылов И.Г.* Сравнительные экспериментальные и имитационные исследования автоматической посадки беспилотного летательного аппарата // Вестник Московского авиационного института. 2009. Т. 16. № 6. С. 150-154.
  31. Aviation Safety Network (ASN) Aircraft accident Boeing-747-412F TC-MCL Bishkek-Manas International Airport (FRU). URL: <https://aviation-safety.net/database/record.php?id=20170116-0>
  32. *Буренок В.М., Найденов В.Г., Поляков В.И.* Математические методы и модели в теории информационно-измерительных систем. — М.: Машиностроение, 2011. — 336 с.
  33. *Рыбаков К.А.* Решение нелинейных задач оценивания при обработке навигационных данных с использованием непрерывного фильтра частиц // Гироскопия и навигация. 2018. Т. 26. № 4(103). С. 82-95.
  34. *Гудвин Г.К., Гребе С.Ф., Сальгадо М.Э.* Проектирование систем управления / Пер. с англ. А.М. Епанешникова. — М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2004. — 911 с.
  35. *Kálmán R.E.* A new approach to linear filtering and prediction problems // Transactions of the ASME — Journal of Basic Engineering. 1960. Vol. 82. No.1 (Series D), pp. 35-45. DOI: 10.1115/1.3662552
  36. *Kálmán R.E., Bucy R.* New results in linear filtering and prediction theory // Transactions of the ASME — Journal of Basic Engineering. 1961. Vol. 83, pp. 95-107.
  37. *Luenberger D.* Observing the state of a linear system // IEEE Transactions on Military Electronics. 1964. Vol. 8. No. 2, pp. 74-80. DOI: 10.1109/TME.1964.4323124
  38. *Luenberger D.* An introduction to observers // IEEE Transactions on Automatic Control. 1972. Vol. 16. No. 6, pp. 596-602. DOI: 10.1109/TAC.1971.1099826
  39. *Cho A., Kim J., Lee S., Kim B., Park N., Kim D., Kee C.* Fully automatic taxiing, takeoff and landing of a UAV based on a single-antenna GNSS receiver // 17th World Congress The International Federation of Automatic Control — IFAC (6-11 July 2008, Seoul, Korea). Vol. 41. No. 2, pp. 4719-4724. DOI: 10.3182/20080706-5-KR-1001.00794
  40. *Marcus G.* Deep learning: A critical appraisal // arXiv preprint 1801.00631. 2018. URL: <https://arxiv.org/abs/1801.00631>
  41. *Верейкин А.А.* Проект дорожной карты развития систем управления беспилотными летательными аппаратами // Молодёжь и будущее авиации и космонавтики: сборник аннотаций 10-го Всероссийского межотраслевого молодёжного конкурса научно-технических работ и проектов (19-23 ноября 2018, МАИ). — М.: Изд-во МАИ, 2018. С. 36-38.

## POSITION AND MOTION CONTROL OF AERIAL VEHICLES IN AUTOMATIC LANDING SYSTEMS: ANALYTICAL REVIEW

Pogosyan M.A.<sup>1</sup>, Vereikin A.A.<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup> *Moscow Aviation Institute (National Research University),  
MAI, 4, Volokolamskoe shosse, Moscow, 125993, Russia*

<sup>2</sup> *“Sukhoi Company”,  
23A, Polikarpov str., Moscow, 125284, Russia*

\* *e-mail: aautres@gmail.com*

### Abstract

The main technical characteristics of automatic landing systems (ALS) of manned and unmanned aerial vehicles (AV) are derived from the characteristics of automatic control systems. The performed analysis of literary sources devoted to the study of the AV automatic control issues at the landing stage revealed a deficit of survey and analytical work, considering comprehensively the problem of the AV automatic control forming during landing process.

The purpose of this work consists in studying the AV spatial position control issues, relevant for the ALS of both manned and unmanned AVs, revealing the main problems getting in the way of AV ALS development and preferred technical solutions, which can be employed while the AV ALS creation.

To achieve the set goal, the following aggregate of systematic interrelated methodological approaches was applied to reveal the basic pros and cons of the objects being analyzed. These approaches are based on:

- search and analysis of scientific and technical literature, and its systematic review;
- analysis of trends to reveal the dominating ones in the ALS development with regard to the AV information support and control;
- SWOT-analysis.

The performed information search on the issues of AV control forming while automatic landing (AL) in scientific and technical literature and other open sources, its analysis and systematic review allowed outline the two groups of techniques for the AV control forming while the AL process:

- control actions forming based on the object state vector, being formed by the information support means;
- control actions forming based on the preprocessed information, being formed by information support means.

The techniques for the automatic control forming related to the second group are of practical interest, thus the subject matter of the article is limited by them.

The works, being analyzed, devoted to the AV control in the process of the AL performing are classified in accordance with to the following problematic areas, to which studying they are dedicated:

- the ALS architecture;
- synthesis of automatic control algorithms;
- fuzzy control;
- the AL process optimization;
- the AL process mathematical modelling.

The technical solutions proposed in the framework of the outlined problematic areas were analyzed, their advantages and disadvantages were revealed.

The authors proposed to employ multi-level architecture, Kalman filter, Luenberger observer, and model-oriented method for designing automatic control systems as the ALS technological base. The inertial navigation system, being corrected by the information obtained from the satellite navigation system with functional add-ons (differential navigation), and radio navigation system as a stand-by information source can be proposed as the AL information support core. The article presents a functional diagram of the ALS built on the proposed principles.

The automatic control system for the AV during the AL execution can be recommended to be built based on stabilization of the set flight path using linear deviations from it and, possibly, changing of the rates of these deviations. This approach will allow employing the constant gains in contrast to the variable coefficients used in the case of the of angular deviations application. Besides, the ALS should ensure the lack of necessity of the crew intervening in control process at low altitudes even in the case of control resources degradation, and preserve its operability in conditions of external information sources loss.

**Keywords:** aerial vehicle, unmanned aerial vehicle, automatic landing, position and motion control of aerial vehicle, automatic landing system.

## References

- Vereikin A.A., Lerner I.I. *Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem "Novye tekhnologii, materialy i oborudovanie rossiiskoi aviakosmicheskoi otrasli"*, AKTO-2016, Kazan, Akademiya nauk respubliki Tatarstan, 2016, vol. 2, pp. 404-409.
- Kolesnikov A.A., Kobzev V.A., Nikitin A.I. *Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2011, vol. 119, no. 6, pp. 125-139.
- Siegel D., Hansman R.J. *Development of an Autoland System for General Aviation Aircraft*. Report No. ICAT-2011-09, September, 2011. MIT International Center for Air Transportation (ICAT), Department of Aeronautics & Astronautics, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02139 USA, 208 p.
- Mazur V.N., Mel'nikova E.A. *Trudy FGUP "NPTsAP". Sistemy i pribory upravleniya*, 2010, no. 1, pp. 44-53.
- Mazur V.N., Mel'nikova E.A. *Trudy MIEA. Navigatsiya i upravlenie letatel'nymi apparatami*, 2011, no. 4, pp. 48-61.
- Mazur V.N., Khlgatyan S.V., Skripnik N.P. *Trudy MIEA. Navigatsiya i upravlenie letatel'nymi apparatami*, 2011, no. 4, pp. 74-83.
- Mazur V.N., Khlgatyan S.V. *Trudy MIEA. Navigatsiya i upravlenie letatel'nymi apparatami*, 2010, no. 2, pp. 17-29.
- Gonzalez P.J., Boschetti P.J., Cárdenas E.M., Rodriguez M. Design of a Landing Control System which considers Dynamic Ground Effect for an Unmanned Airplane. *Ist WSEAS International Conference on Aeronautical and Mechanical Engineering - AEME '13 (Vouliagmeni, Atenas, Grecia)*, pp. 143-148. URL: <http://www.wseas.us/e-library/conferences/2013/Vouliagmeni/MRME/MRME-21.pdf>
- Podoplekin Yu.F., Tolmachev S.G., Sharov S.N. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy*, 2012, no. 3(58), pp. 22-28.
- You D.I., Jung Y.D., Cho S.W., Shin H.M., Lee S.H., Shim D.H. A Guidance and Control Law Design for Precision Automatic Take-off and Landing of Fixed-Wing UAVs. *American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) Guidance, Navigation, and Control Conference (13-16 August 2012, Minneapolis, Minnesota)*, 19 p. DOI: 10.2514/6.2012-4674
- Lerner I.I., Vereikin A.A., Orekhov M.I. *Materialy Tret'ei Vserossiiskoi Nauchno-tekhnicheskoi konferentsii (21-22 September 2017, Moscow, GosNIIAS). "Navigatsiya, navedenie i upravlenie letatel'nymi apparatami"*, Moscow, Nauchtekhizdat, 2017, vol. 1, pp. 200-201.
- Vereikin A.A. *Materialy XXI nauchno-tekhnicheskoi konferentsii molodykh uchenykh i spetsialistov (30 October - 3 November 2017, Korolev)*, Korolev, RKK "Energiya" imeni S.P. Koroleva, 2017, vol. 1, pp. 42-43.
- Bitter V.V., Mikhailin D.A. *Informatsionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy*, 2009, vol. 7, no. 7, pp. 10-14.
- Conte G., Doherty P. Vision-Based Unmanned Aerial Vehicle Navigation Using Geo-Referenced Information. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2009. Article no. 387308, 18 p. DOI: 10.1155/2009/387308
- Kostyukov V.M., Trinh V.T., Nguyen N.M. Airliner automatic landing optimal trajectory shaping based on anthropocentric principle. *Aerospace MAI Journal*, 2016, vol. 23, no. 1, pp. 123-135.
- Kostyukov V.M., Trinh V.T., Nguyen N.M. Realization of passenger plane auto-land desired trajectory shaping algorithm based on anthropocentric principle. *Aerospace MAI Journal*, 2016, vol. 23, no. 3, pp. 84-95.
- Lakovic E., Lotinac D. *Aircraft Landing Control Using Fuzzy Logic and Neural Network*. 8 p. URL: [https://pdfs.semanticscholar.org/9635/94433580c9350c05dd4e5daec60942e31056.pdf?\\_ga=2.175876130.1085320079.1553197709-490411002.1553197709](https://pdfs.semanticscholar.org/9635/94433580c9350c05dd4e5daec60942e31056.pdf?_ga=2.175876130.1085320079.1553197709-490411002.1553197709)
- Raj K.D.S., Tattikota G. Design of Fuzzy Logic Controller for Auto Landing Applications. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 2013, vol. 3, no. 5, 9 p. URL: <http://www.ijsrp.org/research-paper-0513/ijsrp-p1790.pdf>
- Kashyap S.K., Gopalarathnam G. Fuzzy Controller for Aircraft Auto-landing. *UKIERI WORKSHOP (2-3 December 2010, IIT Bombay)*, 8 p.
- Kuzin A.V., Kurmakov D.V., Luk'yanov A.V., Mikhailin D.A. *Trudy MAI*, 2013, no. 70. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=44540>
- Ul'yanov G.N., Ivanov S.A., Vladyko A.G. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy*, 2012, no. 4, pp. 70-73.
- Furtat I.B. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki*, 2013, no. 3(85), pp. 51-55.
- Kuz'min V.P., Yaroshevskii V.A. *Uchenye zapiski TsAGI*, 1984, vol. XV, no. 2, pp. 43-56.
- Kuz'min V.P., Parysheva G.V. *Uchenye zapiski TsAGI*, 1985, vol. XVI, no. 6, pp. 55-66.
- Kuz'min V.P. *Uchenye zapiski TsAGI*, 1987, vol. XVIII, no. 5, pp. 65-69.
- Kuz'min V.P. *Uchenye zapiski TsAGI*, vol. XXIX. 1998, no. 3-4, pp. 134-143.
- Kuznetsov A.A., Kuz'min V.P. *Uchenye zapiski TsAGI*, 2004, vol. 35, no. 3-4, pp. 70-78.
- Kuznetsov A.G., Aleksandrovskaia L.N. *Trudy MIEA. Navigatsiya i upravlenie letatel'nymi apparatami*, 2011, no. 3, pp. 2-11.
- Vereikin A.A., Lerner I.I., Sumatokhin D.V. *Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem (8-10 August 2018) "Novye tekhnologii, materialy i oborudovanie rossiiskoi aviakosmicheskoi otrasli" - AKTO-2018*. Kazan, Kazanskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2018, vol. 3, pp. 63-69.
- Sheval V.V., Krylov I.G. Comparative experimental and imitating researches of automatic landing of a pilotless aircraft. *Aerospace MAI Journal*, 2009, vol. 16, no. 6, pp. 150-154.

31. *Aviation Safety Network (ASN) Aircraft accident Boeing-747-412F TC-MCL Bishkek-Manas International Airport (FRU)*. URL: <https://aviation-safety.net/database/record.php?id=20170116-0>
32. Burenok V.M., Naidenov V.G., Polyakov V.I. *Matematicheskie metody i modeli v teorii informatsionno-izmeritel'nykh sistem* (Mathematical methods and models in the theory of information and measurement systems), Moscow, Mashinostroenie, 2011, 336 p.
33. Rybakov K.A. *Giroskopiya i navigatsiya*, 2018, vol. 26, no. 4(103), pp. 82-95.
34. Goodwin G.C. *Control system design*. Upper Saddle River, NJ, United States, Prentice Hall PTR, 2001, 908 p.
35. Kálmán R.E. A new approach to linear filtering and prediction problems. *Transactions of the ASME – Journal of Basic Engineering*, 1960, vol. 82, no.1 (Series D), pp. 35-45. DOI: 10.1115/1.3662552
36. Kálmán R.E., Bucy R. New results in linear filtering and prediction theory. *Transactions of the ASME – Journal of Basic Engineering*, 1961, vol. 83, pp. 95-107.
37. Luenberger D. Observing the state of a linear system. *IEEE Transactions on Military Electronics*, 1964, vol. 8, no. 2, pp. 74-80. DOI: 10.1109/TME.1964.4323124
38. Luenberger D. An introduction to observers. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1972, vol. 16, no. 6, pp. 596-602. DOI: 10.1109/TAC.1971.1099826
39. Cho A., Kim J., Lee S., Kim B., Park N., Kim D., Kee C. Fully automatic taxiing, takeoff and landing of a UAV based on a single-antenna GNSS receiver. *17<sup>th</sup> World Congress the International Federation of Automatic Control - IFAC (6-11 July 2008, Seoul, Korea)*, vol. 41, no. 2, pp. 4719-4724. DOI: 10.3182/20080706-5-KR-1001.00794
40. Marcus G. *Deep learning: A critical appraisal*. arXiv preprint 1801.00631, 2018. URL: <https://arxiv.org/abs/1801.00631>
41. Vereikin A.A. *Materialy XX Vserossiiskogo mezhotraslevogo molodezhnogo konkursa nauchno-tekhnicheskikh rabot i proektov (19-23 November 2018) "Molodezh' i budushchee aviatsii i kosmonavtiki"*, Moscow, MAI, 2018, pp. 36-38.