

Технология разработки системы управления полетом для беспилотного летательного аппарата с помощью геометрического метода

А.И. Жильцов¹, К.С. Жуков¹, Д.А. Рылеев¹,
А.А. Черничкин¹, Н.А. Чулин², А.Е. Юдин¹

¹ НИИ ИСУ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

² МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Показаны практические результаты, достигнутые при создании системы управления полетом для беспилотного летательного аппарата. На основе геометрического метода синтеза сформированы структура и алгоритмы системы управления полетом. Характерной особенностью синтезированной системы управления является то, что это грубая система [1]. Полученные в летных испытаниях показатели, демонстрирующие точность прохождения маршрута, подтвердили работоспособность применяемых технологий разработки и изготовления системы управления полетом.

E-mail: isu1@bmstu.ru

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, геометрический метод синтеза, система управления полетом, грубая система, автономный полет по маршруту.

Благодаря возросшим технологическим возможностям повышается интерес к методам синтеза структур и алгоритмов систем управления, т. е. к традиционным динамическим аспектам так называемой классической теории управления. В то же время относительная простота программирования управляющих устройств, реализованных на цифровой технике, порождает ложное представление о том, что возможны любые алгоритмические и структурные решения, чем нередко отличаются теоретические работы, доведенные авторами лишь до математического моделирования. Однако конечная размерность и существенная разнотемповость составных частей математических моделей не всегда позволяют получать адекватные результаты при использовании модельных решений в условиях изготовления реальных изделий.

Все результаты, так или иначе связанные с теорией регулирования и управления, оформлены математически, что придает уверенности в их полной корректности и объективности. На самом деле математика всего лишь предоставляет инструмент, позволяющий описывать и различать события или образы и определять расстояния между ними. Присущая инженерной деятельности метризация явлений природы, необходимая для создания технических устройств, невозможна без физических измерений, которые осуществляют с помощью конкрет-

ных датчиков. Достоверность и повторяемость измерений, проводимых в одинаковых условиях, подразумевает их инвариантность относительно времени. Такие фундаментальные физические законы, как законы сохранения, имеют вид интегралов, т. е. подразумевают, что некоторые измеримые физические величины, характеризующие замкнутую физическую систему, не изменяются с течением времени. Иначе говоря, можно считать, что любая замкнутая физическая система стремится к состоянию баланса или равновесия.

На это фундаментальное свойство замкнутой физической системы обратил внимание А.М. Ляпунов, предложив для анализа асимптотической устойчивости динамических систем рассматривать первый член ряда Тейлора, т. е. линеаризацию нелинейной системы **около положения равновесия**. На наш взгляд, это и есть важнейший вклад А.М. Ляпунова в теорию автоматического регулирования и управления.

Практический опыт создания технических устройств, выполняющих автоматически некоторые действия, исчисляется тысячелетиями: от разомкнутых систем вида кукольного театра Герона Александрийского или механического пианино до замкнутых систем автоматического регулирования типа регуляторов Уатта или систем управления движением мобильного робота. Эволюция таких систем отражена и в их названиях: системы автоматического регулирования (САР), системы автоматического управления (САУ), автоматизированные системы управления (АСУ), системы целенаправленного поведения (СЦП).

С точки зрения формирования уставки, являющейся целью управления, перечисленные системы различаются следующим образом:

– САР в процессе своего функционирования должна поддерживать постоянным некоторый параметр, противодействуя внешним возмущениям;

– САУ обеспечивает согласованное изменение уставок для совокупности систем регулирования в зависимости от некоторого рассогласования между текущим и заданным состояниями объекта управления, измеряемыми автоматически;

– АСУ обладают наибольшей гибкостью ввиду того, что уставки задает человек-оператор сообразно своим целям, используя собственные органы чувств для определения расстояния текущего состояния объекта управления от желаемого. Ярким примером АСУ является управляемый пилотом маневренный летательный аппарат;

– СЦП локально заменяет человека-оператора при выполнении конкретной формализованной задачи, причем благодаря своей пропускной способности СЦП, как правило, может это сделать заведомо лучше человека. В то же время человеку надо предоставить такой уровень управления, в процессе которого его участие наиболее эффективно.

Таким образом, совокупно может быть создан некий **инструмент** в виде управляемого изделия, в котором все уровни иерархии информационно и динамически согласованы.

Развитие автоматических систем будет продолжаться, заполняя нижние уровни автоматизированных (с участием человека-оператора) систем управления. Причем наиболее перспективным, на наш взгляд, направлением является построение автоматических систем как систем целенаправленного поведения. Для корректного проектирования СЦП необходимо критически оценить реальные возможности некоторых известных методов синтеза систем управления.

Прежде всего вспомним опубликованные в 1870–1880-е годы уникальные исследования, выполненные И.А. Вышнеградским. Посвященные регуляторам прямого и непрямого действия эти исследования, по сути, заложили фундамент всей теории управления. В результате было найдено инженерное решение, позволившее преодолеть кризис в проектировании паровых машин. Блестящий анализ этих работ проведен в [2]. Тем не менее уже тогда прозвучало предупреждение о том, что задачи теоретической механики методически не соответствуют задачам управления.

Дело в том, что прямая и обратная задачи динамики так или иначе оперируют силами или ускорениями, определяющими характер движения тела, в то время как для реализации управляемого движения по методике обратной задачи динамики подразумевается измерение сил или ускорений, определяющих характер движения, и создание заданных значений тех же сил или ускорений в виде управляющих воздействий за счет внутренних энергетических ресурсов объекта управления и его взаимодействия с окружающей средой. Это означает, что управляющее воздействие, имеющее размерность силы или момента, формируется как функция измеренных сил или моментов, что нарушает принцип независимости сил в механике. В теоретической механике не изучают физические особенности получения этих измерений и, в частности, фазовые задержки, допустимые с точки зрения устойчивости движения при формировании управляющих воздействий на объект управления. Эти вопросы являются предметом исследования именно теории регулирования и управления.

В таком контексте интересны упомянутые результаты И.А. Вышнеградского, касающиеся регулятора Уатта (1784), который в исходном виде представлял собой регулятор прямого действия. Введенный И.А. Вышнеградским катаракт в виде гидравлического демпфера спас систему регулирования от неустойчивости, но все-таки не выполнил своей основной задачи — поддержание заданной скорости вращения выходного вала при изменении момента нагрузки.

В 1873 г. эта задача была решена французским инженером Ж. Фарко, который первым применил не прямое регулирование, введя в контур регулирования усилитель — гидравлический сервомотор с жесткой обратной связью. В конце концов появился **изодром** (1884), т. е. пропорционально-интегральный закон управления. Этот замечательный закон управления и позволил решить задачу поддержания без статической ошибки заданной скорости вращения при изменяю-

щемся моменте нагрузки. Нетрудно понять, что поддержание постоянной скорости в замкнутой динамической системе соответствует ее равновесному или сбалансированному состоянию.

Таким образом, можно сформулировать важный вывод: устойчивая физическая динамическая система, замкнутая регулятором правильной структуры около своего положения равновесия, всегда ведет себя как линейная, но не всякая формально представленная как линейная динамическая система реально соответствует какому-либо положению физического равновесия.

Следует также обратить внимание на то, что при «силовом» синтезе законов управления предъявляют очень высокие требования к знанию точных динамических параметров объекта управления. Впервые проблема исходных данных и их вариаций рассмотрена в [2] и обозначена понятием «грубая система». Отсутствие принадлежности к грубым системам указанных методов содержится в самом подходе к линеаризации, что проявляется в характере связей, накладываемых на динамическую систему. Методы, основанные на использовании опорных функций в виде зависимостей от времени, длины траектории и т. п., в том числе и метод обратной задачи динамики, всегда накладывают на систему кинематические связи, что не может удовлетворять требованиям, предъявляемым к грубым системам.

В отличие от изложенных выше методов, геометрическим методом [3, 4] конструируют траектории движения замкнутой системы управления как принадлежащие некоторой поверхности в конфигурационном пространстве, что подразумевает только геометрические связи, наложенные на динамическую систему.

Необходимость в беспилотной авиации уже ни у кого не вызывает сомнения. Можно утверждать, что подобного рода техника находит широкое применение.

В настоящее время сложилась следующая ситуация.

Во-первых, отсутствие постоянного государственного заказа на проведение работ по созданию беспилотных летательных аппаратов (БЛА) и достаточного финансирования исследований в этом направлении в течение последних 20 лет привело к отставанию России в данной области от таких конкурентов, как США и Израиль.

Во-вторых, вопреки существующему мнению, отставание не удастся сократить путем простого копирования приобретенных за рубежом БЛА, поскольку кроме собственно летательного аппарата (ЛА) из современных композиционных материалов со специальными покрытиями для уменьшения радиолокационной заметности требуется целый комплекс других средств, обеспечивающих функционирование беспилотной авиации.

В-третьих, отсутствие отечественных силовых установок для малоразмерных ЛА является реальной проблемой. Российская промышленность в ее нынешнем состоянии не готова выпускать относительно маломощные двигатели внутреннего сгорания, и тем более

реактивные, ввиду отсутствия госзаказов и внебюджетного финансирования.

В-четвертых, доведение полученной с помощью беспилотного аппарата разведывательной информации до конкретного потребителя представляет собой самостоятельную и достаточно сложную задачу, сопряженную с решением комплекса проблем: фотографирования, радио- и телепередач, взаимодействия с космическими и воздушными ретрансляторами, кодирования и т. п.

В-пятых, для каждого типа БЛА требуется разработать систему управления полетом, обеспечивающую выполнение полета по маршруту и управление летательным аппаратом в различных режимах полета.

Среди перечисленных выше проблем остановимся на задаче разработки системы управления полетом, которую следует рассматривать в текущий момент как ключевую.

В ситуации экстренного решения задачи создания парка БЛА необходимо разработать системы управления полетом для каждого вида и размера БЛА. Учитывая существенное влияние структуры и параметров системы управления на конечный результат, была выделена задача получения такой методики или технологии разработки, которая не только подходила бы к разным по виду и размеру БЛА, но и была бы наименее чувствительна к неточности исходных характеристик и параметров каждого аппарата и к возмущающим воздействиям. Результат был достигнут для стандартного набора измерителей.

В качестве апробации технологии разработки систем управления движущимися объектами с помощью так называемого геометрического метода [4] удалось синтезировать структуру и алгоритмы системы управления полетом для реального ЛА не самой простой конфигурации: спроектирована и реализована система управления полетом для аппарата аэродинамической схемы «утка» с большой удельной нагрузкой на крыло. Бортовое радиоэлектронное оборудование массой порядка 0,5 кг обеспечило высокую траекторную точность полета для аппарата с относительно небольшим аэродинамическим качеством. Успешная реализация была достигнута за счет структурного решения системы управления полетом.

Особенность синтезированной системы управления заключается в том, что данная система является грубой. Это было продемонстрировано широким диапазоном изменения центровок, относительно большими ветровыми возмущениями и высокой траекторной точностью при минимальной информации о динамических параметрах объекта управления. Разработана оригинальная система управления полетом, которая отличается от существующих систем, используемых на других БЛА.

Пилотируемая и беспилотная авиации накопили к настоящему времени огромный опыт, написано большое количество инструкций. Тем не менее ряд технических задач может иметь не единственное

решение. Проверенные и успешно применяемые для пилотируемой авиации структуры систем управления полетом не всегда подходят для БЛА в неизменном виде.

Автоматическая система обеспечивает автономный полет по маршруту практически всех беспилотников независимо от их размеров. С использованием спутниковых навигационных систем обязательным стало применение тяжелых механических инерциальных систем (гироплатформ). Развитие средств микропроцессорной техники позволило реализовать бесплатформенные инерциальные навигационные системы (БИНС), основной функцией которых остается обеспечение системы управления необходимой информацией (углы тангажа и крена) для поддержания ЛА в состоянии полета. Энергичное маневрирование ЛА, сильные ветровые и прочие возмущающие воздействия приводят к так называемому уходу инерциальных систем. Это мешает не только правильному счислению пути, что компенсируется в настоящее время спутниковыми навигационными системами, но и вычислению текущих углов ориентации ЛА, требуемых для поддержания состояния полета.

Для пилотируемых ЛА эти уходы не критичны, так как коррекция ориентации может быть выполнена пилотом с помощью своих органов чувств, в то время как для беспилотной авиации проблема коррекции ориентации сохраняется. Ее решение было в свое время найдено за счет использования дополнительных вычислительных мощностей и алгоритмов типа фильтров Калмана, реализованных в БИНС, основной функцией которых осталось определение ориентации ЛА.

При отсутствии дорогостоящих и тяжелых гироскопов требуется коррекция программно-реализованной в БИНС гиравертикали от той же спутниковой навигационной системы. Последним результатом стало изыскание способов проведения угловой коррекции и счисления пути с использованием в качестве входной информации для фильтров Калмана скорости движения подстилающей поверхности и любой другой информации о местных ориентирах. Такие подходы разрабатывают для того, чтобы застраховаться от потери информации, поступающей от спутниковой навигационной системы. Однако пока все перечисленное выше не позволяет сохранять состояние полета БЛА сложной аэродинамической схемы при полном отсутствии информации от спутниковых навигационных систем.

Авторам данной статьи удалось разработать оригинальную систему управления полетом (СУП). Основная задача состояла в формировании такой структуры СУП, которая бы, во-первых, позволила сохранять сколь угодно долго состояние полета ЛА без получения информации от спутниковой навигационной системы и, во-вторых, при наличии информации о местоположении была бы способна обеспечить выполнение такого полета по маршруту, чтобы достижение поворотных пунктов маршрута (ППМ) обеспечивалось с наилучшей точностью по сравнению с любой другой системой управления,

поставленной на данный ЛА. Кроме того, СУП должна была наилучшим образом противодействовать сложным воздействиям ветра.

Поставленную задачу удалось решить. На испытаниях БЛА схемы «утка» со стартовой массой до 12 кг (при использовании спутниковой навигационной системы GPS) разработанная распределенная система управления показала следующие результаты:

Точность, м:	
прохождения ППМ	30
поддержания заданной высоты	2
Воздушная скорость полета, км/ч	90...165
Повторяемость прямолинейных участков маршрута	
в полосе шириной, м	15
Скорость ветра, м/с:	
при старте	До 15
на высоте 500 м	25
Перегрузка	До 3
Высота, м н.у.м.:	
реально достигнутая	2500
заявляемая	3000
Продолжительность полета, ч:	
реально достигнутая	3
заявляемая	4

В настоящее время можно констатировать, что разработана технология создания систем управления полетом, обеспечивающих полет по маршруту, для широкого класса БЛА. Условием выполнения задачи является объективная способность ЛА к полету, что может быть продемонстрировано ручным пилотированием по радиоканалу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андронов А.А., Понтрягин Л.С. Грубые системы // ДАН СССР. 1937. Т. 14. С. 247–251.
2. Андронов А.А., Вознесенский И.Н. О работах Д.К. Максвелла, И.А. Вышнеградского и А. Стодолы в области регулирования машин // Максвелл Д.К., Вышнеградский И.А., Стодола А.: Теория автоматического регулирования (Классики науки). М.: АН СССР, 1949.
3. Арутюнов С.К., Жильцов А.И. Адаптивное моделирование как метод автоматизированного проектирования системы автоматического управления движущимся объектом // Труды МВТУ. № 458. Межвузовский сборник «Автоматизированное проектирование систем управления». 1986. С. 36–45.
4. Жильцов А.И., Васечкин Ю.С., Чулин Н.А. Геометрический метод синтеза системы управления полетом // Тезисы доклада на юбилейной (170 лет) науч.-техн. конф. Ч. 1. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. С. 19.

Статья поступила в редакцию 25.10.2012