

СОВРЕМЕННЫЕ КОНЦЕПЦИИ И ПОДХОДЫ К РАЗРАБОТКЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И АЛГОРИТМОВ БПЛА В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЁННОСТИ: ОБЗОР

Ермилов А.С.

Российский университет дружбы народов, Москва

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, нечеткая логика, робастное управление, адаптивные системы управления, искусственный интеллект, оптимизация.

Аннотация. На данный момент актуальность вопросов управления беспилотными летательными аппаратами сложно переоценить – от них зависит не только промышленное и технологическое развитие страны, но и ее безопасность. Обзор литературных источников по данной тематике направлен на рассмотрение современных подходов к разработке алгоритмов управления беспилотными летательными аппаратами и обусловлен необходимостью систематизации наработок в данной области. В контексте данной проблемы затронута история развития беспилотными летательными аппаратами, выделены наиболее значительные ее моменты. Кратко рассмотрены возможности применения в различных отраслях промышленности. Данные литературных источников показывают, что за последнее время произошло смещение интересов от теоретического программирования до вопросов их практического применения в военных целях. Мы ограничились анализом литературных данных за последние 20 лет, в которых освещены вопросы разработки алгоритмов адаптивных систем управления, затронули теоретически вопросы и некоторые аспекты применения нечеткой логики искусственного интеллекта при разработке алгоритмов управления беспилотными летательными аппаратами в условиях неопределенности. Сделаны выводы, что нечеткая логика существенно превосходит по улучшению управления аппаратами, а в сочетании с самообучаемыми нейросетями широко применяется для управления беспилотными летательными аппаратами, в том числе для управления группой объектов. Преодоление всех существующих проблем данных подходов находится в стадии разработки: появляются новые пути решения, математические модели и алгоритмы работы. Современные адаптивные системы управления значительно повышают точность и надежность управления летательными аппаратами в динамически изменяющихся условиях полета. Интеграция машинного обучения и нечеткой логики в системы управления позволяет оптимизировать реакцию летательного аппарата на неопределенные внешние воздействия (изменение погодных условий, технические неисправности, изменения аэродинамических характеристик, воздействие враждебных средств противодействия). Для экспериментального подтверждения различных гипотез широко применяют методы компьютерного моделирования, например, для имитации различных условий полета, проверки адаптивности системы управления. При этом используют математические методы анализа.

MODERN CONCEPTS AND APPROACHES TO THE DEVELOPMENT OF CONTROL SYSTEMS AND ALGORITHMS FOR UAV UNDER CONDITIONS OF UNCERTAINTY: A REVIEW

Ermilov A.S.

RUDN University, Moscow

Keywords: unmanned aerial vehicle, fuzzy logic, robust control, adaptive control systems, artificial intelligence, optimization.

Abstract. Nowadays the relevance of the management of unmanned aerial vehicles is difficult to overestimate since not only the industrial and technological development of the country, but also

government security depends on them. The review of literature on this topic is aimed at discussing modern approaches to the development of drones control algorithms and is conditioned by the need to systematize developments in this area. In the context of this problem, the history of the development of drones is touched upon, its most significant moments are highlighted. The possibilities of using drones in various industries are briefly considered. Data from literature sources show that recently there has been a shift of interests from theoretical programming of drones to issues of their practical application for military purposes. The literature data over the past 20 years was analyzed which highlights the issues of developing automated control system algorithms, issues and some aspects of the application of fuzzy logic of artificial intelligence in the development of drones control algorithms in conditions of uncertainty were theoretically touched upon. It is concluded that fuzzy logic is significantly superior in improving the control of devices, and in combination with self-learning neural networks is widely used to control drones, including the control of a group of objects. Overcoming of all existing problems of these approaches is under development: new solutions, mathematical models and algorithms are emerging. Modern adaptive control systems significantly improve the accuracy and reliability of aircraft control in dynamically changing flight conditions. The integration of machine learning and fuzzy logic into control systems makes it possible to optimize the aircraft's response to uncertain external influences (changes in weather conditions, technical malfunctions, changes in aerodynamic characteristics, the impact of hostile countermeasures). To experimentally confirm various hypotheses, computer modeling methods are widely used, for example, simulating various flight conditions, testing the adaptability of the control system. At the same time, mathematical methods of analysis are used.

Введение

На данный момент актуальность вопросов управления беспилотными летательными аппаратами (БПЛА) сложно переоценить – от них зависит не только промышленное и технологическое развитие страны, но и ее безопасность. Научные отрасли, занимающиеся разработкой БПЛА, активно развиваются, что обусловлено необходимостью быстрого внедрения новых разработок на рынок вооружений, в частности БПЛА. За последнее время происходит стремительный рост различных отраслей науки и техники, участвующих в этом процессе. Развитие БПЛА-отрасли имеет важную практическую задачу, что в свою очередь, затрагивает науки, так или иначе причастные к разработкам в этой области – математику, инженерные области, нейропрограммирование и др. Несмотря на длительную историю развития, на данный момент остается достаточное количество нерешенных задач, бросающих вызов ученым-теоретикам и инженерам-разработчикам БПЛА. Для общего представления о рассматриваемом предмете кратко остановимся на развитии этой отрасли военной промышленности.

История развития летательных аппаратов в более приближенном нам понимании восходит к концу XIX – начала XX вв. и связана с именами итальянского ученого Форланини Э. и российского изобретателя А.Ф. Можайского. Сконструированные ими первые летательные аппараты держались в воздухе очень недолго – несколько секунд, но именно эти попытки заложили основы авиаконструирования беспилотных аппаратов. Конечно, первые изобретённые тогда самолеты были еще далеки от наших представлений о современных летательных аппаратах (ЛА), но уже в начале XX в. некоторые зарубежные ученые ввели понятие «беспилотный летательный аппарат». Активная успешная работа над управляемыми аппаратами была обусловлена развитием радиосвязи и освоением ее возможностей. Улучшение качества

полетов происходило стремительно – уже в середине 1920-х гг. американский самолет Curtiss F-5L прошел успешные испытания, в которых полностью радиоуправляемый полет включал также взлет и посадку [1]. Чуть позже известный ученый и изобретатель А. М. Лоу, служивший в Королевском Летном корпусе Великобритании, совместно с группой ученых начинает разработки беспилотных самолетов и ракет, которые впоследствии нашли отражение во многих его работах, в частности Electronics everywhere [2].

Дальнейший период истории, который характеризовался масштабными затяжными войнами и конфликтами (1920-1950 гг.), привел к созданию радиоуправляемых самолетов, планеров специального назначения и других механизмов (Curtiss F-5L, «Queen Bee», БПЛА «Radioplane OQ-2», ПСН-1 и ПСН-2) [3].

Анализ литературных источников, посвященных изучению истории развития беспилотных аппаратов показал, что сказать точно, какие модели и каким образом были использованы в военных конфликтах того времени, крайне затруднительно. Зачастую противоречивые сведения о ходе испытаний, исчезновение и подделка чертежей, а также невозможность четко проанализировать плохо сохранившиеся архивные данные (газеты, журналы и др.) того времени дают нам возможность сказать одно – от исследований, показавших огромный военный потенциал, не отказалась ни одна страна. Поэтому на протяжении всего XX века интерес к развитию беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) сохранялся во многих странах, что связано в первую очередь со все расширяющимися перспективами их использования в военных конфликтах. На данный момент использование БПЛА в военных целях достаточно известно. Отметим, что, несмотря на огромные успехи в своем техническом развитии, они все же не смогут полностью заменить пилотируемый аппарат. Но их использование для транспортировки грузов, в том числе направленных на поражение объектов или иных задач, выполнение которых ставит под угрозу жизнь пилота, возрастает.

Во всех отраслях промышленности конструкция, их управление и программирование имеет свои особенности, зависящие от целей и задач аппаратов. Кратко остановимся на некоторых особенностях использования БПЛА в зависимости от конкретных задач в мирных целях. 4D-картографирование используется для дронов при оптимизации маршрутов для доставки грузов в малонаселенные и труднодоступные регионы России [5]. Для ведения точного цифрового сельского хозяйства активно применяется индекс NDVI и данные ДЗЗ [6-7].

Все активнее дроны используют в медицинских целях, например, для помощи людям при авариях, санитарной обработке улиц, определении качества воздуха и др. [8].

Таким образом, отрасли использования БПЛА на настоящий момент активно расширяются, что приводит к усложнению задач, требующих от специалистов новых разработок.

Анализ специальной литературы показал, что еще в 2010-2019 гг. интерес к разработке БПЛА в России не был на высоком уровне – в литературе, в основном

освещались вопросы теоретического характера математических расчетов, алгоритмов моделирования и др., однако в последнее время развитие этой отрасли логично претерпевает существенные изменения, соответственно изменились и темы – преобладающее большинство работ затрагивает военные практические аспекты применения и противостояния БПЛА [3, 9]. Это же подтверждает анализ литературных источников из открытых баз – наибольшее количество публикаций по данной теме российских ученых приходится на период 2000-2020 гг. – период, когда многие страны оказались втянуты в гонку вооружений, особенно новейших разработок БПЛА.

Варианты использования БПЛА в различных военных целях, оценка их возможностей и недостатков, приведены во многих работах отечественных и зарубежных авторов, находящихся в открытом доступе. Зарубежными авторами создан журнал «Drones», в котором публикуются работы по данному направлению.

Рассматривая развитие БПЛА в разных контекстах и аспектах, ученые отмечают, что развитие стратегии управления аппаратами идет в тесной связи с другими многочисленными науками и разработками, в частности искусственного интеллекта, математики, механики, аэродинамики и др. Исследования такого рода направлены в основном на решение проблем управления и снижения до минимума на БПЛА внешних воздействий, что особо актуально при использовании оборудования в экстремальных зонах, например, при исследовании нефтегазоносных скважин, вулканов, ледников и др. [10]. Одной из таких задач является разработка адаптивных систем управления (АСУ) БПЛА и некоторых аспектов нечеткой логики при машинном обучении. Учитывая обстановку последних лет, исследования в данных областях для России являются очень важными и необходимыми. Поэтому мы поставили **цель** – провести оценку современного состояния разработок в области программирования БПЛА в Российской Федерации.

В задачи исследования входило:

- 1) рассмотреть варианты АСУ в управлении БПЛА;
- 2) изучить концепцию и основные идеи нечеткой логики в контексте повышения автоматизации и адаптированности полетов к конкретным условиям;
- 3) определить особенности синтеза нечеткой логики и искусственного интеллекта для разработки программ БПЛА.

Результаты и обсуждение

Адаптивные системы управления

История теории управления (а также адаптивного управления) достаточно интересна и ведет нас к глубокой древности (когда использовали саморегулирующиеся простые аппараты), однако более современный ее этап сравнительно недолог и начитывает около 50 лет. На данный момент принято считать, что адаптивное управление – это управление в условиях текущей (реальной) информации воздействия внешней среды на какой-либо объект. Данная ситуация называется «ситуация немоделируемой динамики», а в математическую модель объекта входят факторы, которые нельзя контролировать, или неопределенности, совокупность которых объединяется в один вектор:

- медленно изменяющиеся (по сравнению с процессами самого объекта) коэффициенты управления, называемые квазистационарными, и составляющие квазистационарную неопределенность;
- сигнальная неопределенность связана с параметрами неизмеряемой функции времени;
- функциональная неопределенность.

Задачи управления объектами с неопределенными факторами в основном направлены на:

- поиск закона управления без неопределенных факторов (или в совокупности – неизвестный вектор);
- разработку параметров закона, направленных на создание ограниченности всех сигналов в контуре замкнутой системы;
- установление положений выполнения для всех факторов предельного целевого неравенства.

Если данный вектор неизвестен (что свидетельствует о неопределенности объекта), алгоритм решения этих задач будет следующим:

- 1) исследовать объект управления;
- 2) установить вектор;
- 3) разработать алгоритм управления.

Тем не менее, такой простой алгоритм действий на практике неприемлем, так как в самой этапности заложена задержка, во время которой происходит изменение характеристики объекта; также необходимо учитывать вероятность невозможности получить каким-либо образом точную оценку вектора. Таким образом, необходимо поменять стратегию, убрав из нее этапность (задержку), и она будет состоять из одномоментного изучения объекта и управления им. Методы схемных решений, предложенные в 70-89-х гг. XX века были основаны на методах непосредственной компенсации. Тем не менее, для решений задач управления необходимо использовать более сложные методы, например, итеративную процедуру синтеза, получившую название адаптивного обхода интегратора, которая сочетает идеи адаптивной настройки алгоритма управления с итеративными процедурами синтеза нелинейных законов объекта.

В любой вариант АСУ включен регулятор или устройство, которое управляет объектом. В зависимости от того, как работает регулятор, способен ли он изменять параметры или свою структуру (природу), все АСУ можно разделить на два типа – самонастраивающиеся (первый вариант работы) и самоорганизующиеся (второй вариант).

Вопросами улучшения работы регуляторов занимается робастное управление, методы которого нашли широкое применение при управлении БПЛА. Робастные системы управления сочетают моменты классического, адаптивного и нечеткого управления. Отдельные технологии синтеза робастного управления (такие как «Н на бесконечности (H_∞)», H_2 -синтез) с одной стороны, работают с устойчивостью и чувствительностью системы, а с другой, что является их недостатком – требуют большого количества итераций или индивидуального подхода к параметрической робастности объекта управления [11]. Исследование данных типов синтеза при математическом моделировании

работы БПЛА (в частности, расчёта стабилизации угла тангажа) показало, что при продольном движении аппарата в атмосфере необходимо заложить высокую робастную устойчивость системы. В этом случае возможно применить теорию синтеза H_∞ для оптимальных регуляторов, что, однако, трудновыполнимо, так как H_∞ синтез не позволяет ограничить порядок регуляторов [12]. Тогда в данном случае можно прибегнуть к методу D-разбиений, который приведет к снижению порядка регулятора по H_∞ критерию [13]. Предлагается следующее инженерное решение этой проблемы – для дальнейших расчётов выбрать наиболее неустойчивый полином Харитонова [14].

Некоторые авторы в своих исследованиях пришли к выводу, что использование датчиков необходимо минимизировать. С одной стороны, адаптивное и робастное управления по выходу даст возможность экономии на самом изготовлении датчиков, с другой стороны – устранение датчиков скажется положительно на снижении дополнительных погрешностей, связанных с ошибками измерений.

Учитывая, что процедуры синтеза адаптивного и робастного управления сложны, авторы приходят к выводу, что необходима разработка новых методов, которые обеспечат получение простых и малоразмерных регуляторов. Проведя анализ многочисленных работ, авторы считают, что дополнительные исследования возможностей и перспектив адаптивного и робастного управления не требуются.

Ученые А.А. Бобцов и В.О. Никифоров, рассматривая в своем обзоре основные методы, такие, как метод расширенной ошибки, Морза, итеративные процедуры синтеза, шунтирование, робастную модификацию, изменения, указывают, что кроме достоинств, данные процедуры имеют и вышеперечисленные недостатки – сложность практического применения и высокую размерность регулятора. Авторы предлагают практическое решение синтеза адаптивного регулятора в условиях, когда сигнал управления содержит запаздывание, так как эта проблема остается открытой для неустойчивых и нелинейных систем.

Другие методы робастного синтеза также сложны в использовании, в основном из-за большого числа итераций.

Таким образом, важная роль регуляторов в работе АСУ несомненна – они выполняют функции адаптивной идентификации переменных состояния объекта, осуществляемой про помощи наблюдателей. Работа регуляторов сводится к одномоментной адаптации объекта и движения к внезапно изменяющимся внешним условиям. Если это будет выполнено, то сама система начнет управлять объектом в переходном режиме.

В своей работе Польшанова Д.К. указывает на нереализуемость этих задач, что обусловлено, с одной стороны, отсутствием разработок оптимальных методик синтеза и расчета адаптивных наблюдателей, с другой – невозможностью практического применения в неустойчивых системах с запаздыванием систем адаптивно-модального управления, а также отсутствием схем АСУ и наблюдения, которые могли бы работать с учётом всех особенностей объекта. На основании расчёта математической модели работы АСУ, автор

приходит к выводу, поиск решения данной проблемы лежит в плоскости разработки простых адаптивных структур и наблюдателей. По результатам исследования разработана схема автоматического управления, в которой заложена адаптация объекта в установленные моменты времени. В дальнейшем показатели системы, полученные в эти моменты, АСУ сравнивает с установленными порогами. Для этого необходимо выделить подсистемы, производящие в определённый момент модификацию коэффициентов объекта управления и регулятора. Таким образом, АСУ будет производить корректировку коэффициентов ПИД-регулятора при определении критических изменений качества переходного процесса, чтобы показатели переходного процесса соответствовали апериодическому или близкого к этому состоянию процесса. Схема алгоритма работы АСУ следующая:

- инициализация данных регулятора в установленные моменты времени (1 с);
- передача эталонных значений в ПИД-регулятор;
- корректировка системы в 1 с;
- расчет системой относительного отклонения накопленной ошибки от эталонных показателей в течение 60 с;
- корректировка коэффициентов достижения порога ошибки в 10%;
- после подачи ступенчатого сигнала приведение системы к переходным характеристикам системы [15].

Вопросы применения ПИД-регулятора (ПД-регулятора) важны при разработке алгоритмов расчета переходных режимов движения аппарата. Такие исследования были проведены для конвертоплана, по результатам была разработана математическая модель его пространственного движения в изменяющихся условиях при одновременном отклонении вектора тяги вращающихся винтов. Приведена структурная модель устройства, состоящая из четырех вращающихся винтов. Доказана необходимость наличия нескольких контуров пропорционально дифференциального управления как углом тангажа, так и движением в вертикальной и горизонтальной плоскости. Каждый отдельный контур должен иметь схему, корректирующую показатели отклонения управляемых параметров от заданных значений и препятствующую любому значительному отклонению.

Хотя многие исследования направлены на разработку систем дополнительной поддержки управления БПЛА, данная проблема остается актуальной.

Для разработки алгоритма полета с неустановленными параметрами некоторые авторы предлагают ввести наблюдателя. Так, было проведено компьютерное исследование для БПЛА-70V, направленное на сравнение АСУ по состоянию с наблюдателем и по выходу. При рассмотрении процессов стабилизации полета на основании с учетом действия вертикальных ветровых возмущений, имеющих периодическую и скачкообразную природу, ученые пришли к выводу, что АСУ с наблюдателем состояния в данных условиях показала большую эффективность, чем АСУ по выходу [16].

Для небольших летательных аппаратов также стоит проблема разработки АСУ, в которой был бы учтен фактор ограниченного времени. Эффективность работы АСУ в основном зависит от внешних показателей – температуры и скорости восходящих и нисходящих воздушных потоков, влияющих на такие важные аспекты, как емкость аккумуляторов и полетные характеристики БПЛА.

Учеными рассмотрен ряд факторов, при которых можно использовать АСУ для группы коптеров. В данном случае необходимо наличие постоянной телеметрии центрального блока АСУ с каждым объектом в группе. Телеметрическая связь позволит проводить расчет в режиме реального времени основных параметров полета и уровня заряда аккумулятора. Также необходимо использовать аккумуляторы с возможностью передачи блоку управления информации о текущем уровне заряда и других параметрах аккумулятора. Важно предусмотреть возможность автономной подзарядки БПЛА при неточном приземлении на зарядную станцию, а также мягкую посадку при преждевременном разряде аккумулятора. Для подстраховки необходимо увеличить количество БПЛА с функциями стабилизации полета при нестандартных погодных условиях в расчетной группе, самостоятельного возврата на базу при отсутствии связи с центральным блоком управления.

В реализации программы полета группы БПЛА, а также повышения ее устойчивости вводят еще один параметр – расстояние между объектами группы и возможность его изменения. Одним из наиболее популярных алгоритмов является метод «лидер – ведомый», который имеет однако два существенных недостатка – отсутствие связи от «ведомого» к «лидеру», а также потеря всей группы, которую необратимо влечет потеря «лидера». Второй способ основан на методе «консенсуса». Исследователи подчеркивают, что метод поддержания связи со всеми объектами в группе приведет к образованию большого числа контуров, что затруднит масштабирование системы. Для расчёта параметров группы БПЛА с учетом масштабирования предложено использовать метод Ляпунова, синтезируя его нелинейными законами динамики полета группы БПЛА.

Таким образом, в ходе решения любой поставленной задачи необходимо сочетать варианты адаптивного и оптимального управления – первое может работать в неопределенной и динамичной среде, а второе – обеспечить оптимизированные решения, основанные на конкретных целях [17].

Кратко рассмотренные нами некоторые математические аспекты разработки АСУ в дальнейшем обязательно будут использованы в практических целях.

Нечеткая логика и искусственный интеллект

При использовании лингвистических переменных присутствует субъективность способов определения нечеткости, так как их определяет эксперт, поэтому в отдельных случаях методы нечеткой логики могут быть заменены на методы многозначной. Например, для значения «помеха в плоскости x » переменной «пеленг» может быть целый ряд лингвистических без числового эквивалента оценок, как-то: «справа», «спереди» и т.д. В первом приближении их определяет текущая ситуация, а не эксперт. Поэтому в данном случае актуально

применение многозначной логики, в которой шкала истинных значений является решеткой общего вида.

Основываясь на применении регуляторов с нечеткой логикой Лысенко Л. Н. с соавторами разработал математическую модель замкнутого контура управления полетом дистанционно пилотируемого летательного аппарата (ДПЛА). Компьютерные расчеты позволяют утверждать, что применение модифицированных нечетких регуляторов повышает качество управления при старте ДПЛА, отягченным сильными внешними возмущениями и значительным изменением скорости и высоты полета

Матвеев Е.В. с соавтором, исходя из того, что при большом размахе параметров объекта управления стационарная математическая эталонная модель системы становится неприемлемой для решения задачи управления БПЛА в условиях различных режимов полета предлагают при построении систем управления на основе метода линеаризации обратной связью использовать нечеткие логические выводы. Ими рассмотрена возможность построения адаптивной эталонной модели с идентификацией, которая направлена на оценку неустановленных параметров полета БПЛА. При этом значительно уменьшается влияние неопределенных переменных на качество систем управления.

Потудинский А.В. разработал конструкцию контроллера динамики полета, которая учитывает различные неопределенности для БПЛА средней дальности. В ходе работы наряду с нелинейностями динамики полета дополнительно были учтены основные неопределенности – внешние помехи, ошибки моделирования, неопределенные показатели контроллера. Разработан адаптивный контроллер нечеткой логики нелинейной динамики полета, работающий при наличии множества неопределенностей. Алгоритм его работы следующий:

- установление параметров оптимальной эталонной модели, стабилизируемой с помощью процедуры линейного квадратичного регулятора;
- на основании эталонной модели разработать контроллер нечеткой логики;
- произвести устранение неопределенностей коэффициентов усиления контроллера с помощью перенастройки и коррекции.

Таким образом, функция контроллера в данном случае – улучшать стабилизацию поперечной и продольной динамики полета, а также определение и корректировка переменных состояния эталонной модели при работе в различных неопределенных условиях. В качестве модели эксперимента была использована математическая модель БЛА «Форпост-Р», контроллер динамики полета (AFLC) был смоделирован с помощью метода нечеткой логики Ляпунова. Для увеличения надежности работы ему были присвоены адаптивные коэффициенты усиления. Для механизма адаптивного управления была разработана стратегия управления на основе эталонной модели линейно-квадратичного регулятора (LQR). Расчеты показали существование обратная зависимость между строгостью эталонной модели и производительностью контроллера (AFLC). Ошибки отслеживания увеличиваются, если эталонная модель строго определяет идеальные свойства отклика во временной области (как время нарастания или время установления). С целью решения этой задачи настраиваемые коэффициенты усиления контроллера были скорректированы с использованием

законов адаптации на основе Ляпунова, которые стали устойчивыми к неопределенностям. В соответствии с требованиями к условиям полета контроллер смог стабилизировать боковую и продольную динамику полета БПЛА, а также переменные состояния эталонной модели; ошибка отслеживания была равной нулю.

Другие исследователи предложили при расчете движения БПЛА в условиях сложного рельефа и обхода препятствий применять алгоритм системы нечеткого вывода типа Мамдани. В качестве лингвистических переменных входа использованы сектора пространства. Система направлена на оценку расстояния объекта до препятствия и поиск возможности его обхода. Таким образом, нечеткая модель движения производит изменение угла поворота в горизонтальной плоскости, высоты полета и скорости движения БПЛА. Авторы взяли в расчёт пять входных лингвистических переменных: впереди, слева, справа, выше, ниже и три выходных: угол поворота, высота и скорость.

Подобные исследования проведены для расчетов управления ЛА в канале продольного движения для осуществления управлением угла тангажа.

В последнее время нечеткую логику все более сочетают с методами нейросетевого моделирования. На примере многофакторной неопределенности показана эффективность подобного подхода, авторы указывают, что обоснованный ими подход направлен на решение задач формирования принятия проектных решений (параметров) на основе нечеткой логики и нечеткого вывода.

Также нечеткое управление применяют и для более сложных моделей, таких как группы БПЛА. В своих работах Муслимов Т.З. рассматривает подобные методы самонастройки групповых регуляторов БПЛА, в основе которых лежит обеспечение каждого объекта из группы эталонной моделью всей группы. Для этого предложена упрощенная кинематическая модель второго порядка каждого БПЛА. Это позволит снизить вычислительную нагрузку на бортовые системы – каждая машина будет производить вычисления по эталонной модели, сравнивая их с данными о реальном положении по отношению к другим БПЛА. Полученные рассогласования обрабатываются нечетким регулятором, в котором параметры нечеткого вывода установлены с помощью нечетких функций Ляпунова, что обеспечивает асимптотическую устойчивость контура адаптации. Следовательно, такой подход позволяет сохранять устойчивость всей системы группы БПЛА, улучшать возможности изменения траекторий при перестройке в другую форму группы, при таких сценариях полета формации БПЛА, как следование вдоль линии пути, реализация трехмерных формаций, облет препятствий, а также для настройки систем управления карданным подвесом камеры.

Часто при разработке нейросетей используют биологически подобные теории. Так, на основе психологической теории деятельности и биологически правдоподобной иерархической модели распознавания разработан знаковый подход к описанию знаний агента в группе БПЛА. В данной модели представлена возможность включения процесса обучения – то есть система будет обладать способностью обрабатывать поступающую сенсорную информацию и осуществлять ее обработку. Такая система называется знаковой пространственно-

временной картиной мира и основана на методах и теориях знаков Выготского и Леонтьева. Необходимо отметить, что достаточно большое количество существующих наработок по данной теме свидетельствуют об актуальности и недостаточной разработанности вопроса.

В своей работе Стасенко Д.В. с соавторами на основании анализа существующих методов и способов улучшения навигации БПЛА с использованием методов искусственного интеллекта таких, как DQN, PPO, SAC, SLAM, 3D-modelling, визуальную одометрии и других, пришли к выводу, что наиболее оптимальным вариантом на данный момент является использование алгоритмов на основе нечеткой логики.

Необходимо отметить, что использование методов нечеткой логики зачастую идет вместе с разработками нейросетей, машинного обучения и других вариантов применения искусственного интеллекта. Так, Андриевский Б.Р. с соавторами при анализе некоторых аспектов применения ИИ отечественными и зарубежными учеными, пришли к выводу, что, несмотря на все разработки, на данный момент искусственный интеллект не может полностью заменить человека [18]. Это значит, что необходимы дальнейшие разработки в этой области, что обусловлено актуальностью задачи. В открытом доступе находится небольшое количество публикаций, посвященных проблемам использования нейросетей в управлении и программировании БПЛА. Тем не менее, интерес к данной теме огромен, несмотря на сложности и необходимость проведения фундаментальных исследований с задействованием большого количества ученых из разных областей.

Выводы

Проведенное нами исследование проблем использования АСУ, алгоритмов нечеткой логики, интегрирования искусственного интеллекта на основании доступной литературы позволяет сделать следующие выводы:

- Несмотря на давность проблем, все они находятся в стадии разработки: появляются новые пути решения, математические модели и алгоритмы работы.

- Современные адаптивные системы управления значительно повышают точность и надежность управления летательными аппаратами в динамически изменяющихся условиях полета.

- Интеграция машинного обучения и нечеткой логики в системы управления позволяет оптимизировать реакцию летательного аппарата на неопределенные внешние воздействия (изменение погодных условий, технические неисправности, изменения аэродинамических характеристик, воздействие враждебных средств противодействия).

- Для экспериментального подтверждения различных гипотез широко применяют методы компьютерного моделирования, например, для имитации различных условий полета, проверки адаптивности системы управления. При этом используют математические методы анализа.

Тем не менее, остается еще много задач, требующих детальных исследований. Необходимо помнить, что от комплексного и фундаментального подхода к их решению зависит не только технологическое развитие страны, но в первую очередь – ее безопасность.

Список литературы

1. Фомичев М.А. История создания и развития беспилотных летательных аппаратов // Сборник материалов Пятого Симпозиума конвергентных исследований с международным участием «Перспективы беспилотных технологий в различных пространственных средах: конвергентный подход». – Нижний Новгород: АНО Центр СРПН, 2023. – С. 40-43.
2. Low A.M. Electronics everywhere. – New York: J. Day Co, 1951. – 151 p.
3. Филиппов А.А., Олейников Е.П. История и перспективы применения беспилотных летательных аппаратов // Материалы XXIII Международной научно-практической конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева. Часть 1. – Красноярск: ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», 2019. – С. 463-464.
4. Кудрявцев Д.В., Магдин А.Г., Припадчев А.Д., Горбунов А.А., Нестеренко Р.А. Всесторонняя обработка посевов при помощи беспилотного летательного аппарата сельскохозяйственного назначения // Аграрный вестник Верхневолжья. – 2022. – Т. 1, №38. – С. 64-70.
5. Головачев Н.С. Принципы применения дронов и 4Д-картографии для решения вопроса доставки экстренных грузов в малонаселенные районы России // Устойчивое развитие России: Сборник статей III Всероссийской научно-практической конференции. – Петрозаводск: МЦНП «Новая наука», 2024. – С. 222-228.
6. Чурсин А.И., Першина М.Е. Применение БПЛА в точном земледелии для эффективности использования сельскохозяйственных земель // Journal Of Agriculture and Environment. – 2024. – Т. 6, №46. – doi.org/10.60797/JAE.2024.46.11.
7. Вечерков В.В., Дунаева Е.А. Исследование возможности использования БПЛА для идентификации состояния посевов сельскохозяйственных культур // Агрохимическое обеспечение цифрового земледелия: Материалы Международной научной конференции. – Москва: ВНИИ Агрохимии, 2019. – С. 16–21. – doi.org/10.25680/VNIIA.2019.34.57.008.
8. Войтов И.В., Комаров М.А., Дубина А.В. Мониторинг качества воздуха при помощи беспилотных летательных аппаратов с мобильными газоанализаторами // Сборник статей Международного молодежного форума «Беспилотные аппараты "БПЛА-2024"». – Минск: Белорусский государственный технологический университет, 2024. – С. 111-114.
9. Павлов З.С., Данилова В.Г. История развития беспилотных летательных аппаратов и их использование в современных условиях // Динамика развития системы военного образования: Материалы VI Международной научно-практической конференции. – Омск: Омский государственный технический университет, 2024. – С. 755-761.
10. Богоявленский В.И., Богоявленский И.В. Изучение взрывной дегазации Земли из криолитозоны Арктики на Бованенковском месторождении с применением БПЛА // Наука и техника в газовой промышленности. – 2024. – Т. 1, №97. – С. 59-68.
11. Егупов Н.Д., Пупков К.А. Методы классической и современной теории автоматического управления. Т. 2. Синтез регуляторов систем автоматического управления. – М.: МГТУ им. Баумана, 2004. – 616 с.
12. Грязина Е.Н., Поляк Б.Т., Тремба А.А. Синтез регуляторов низкого порядка по критерию H_∞ : параметрический подход // Автоматика и телемеханика. – 2007. – № 3. – С. 94-105.
13. Воробьев В.В., Киселёв А.М., Поляков В.В. Системы управления летательных аппаратов. – М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 2008. – 203 с.
14. Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления. – М.: Лаборатория базовых знаний, 2002. – 832 с.
15. Польшгалова Д.К. Адаптивное управление нестационарных систем // Автоматизированные системы управления и информационные технологии: Материалы всероссийской научно-технической конференции. – Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2021. – Т. 1. – С. 426-431.

16. Путов В.В., Нгуен В.Ф., Путов А.В., Нгуен Т.Т., Чан К.Т. Адаптивное управление продольным движением беспилотного летательного аппарата // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. – 2017. – № 4. – С. 35-43.
17. Якшибаев А.Р., Борисова О.В. Достижения в области адаптивных и оптимальных систем управления: обзор последних исследований. Формирование профессиональной направленности личности специалистов – путь к инновационному развития России // Сборник статей V Всероссийской научно-практической конференции. – Пенза: Пензенский государственный аграрный университет. – 2023. – С. 501-503.
18. Андриевский Б.Р., Попов А.М., Михайлов В.А., Попов Ф.А. Применение методов искусственного интеллекта для управления полетом беспилотных летательных аппаратов // Аэрокосмическая техника и технологии. – 2023. – Т. 1, №2. – С. 72-107.

Сведения об авторе:

Ермилов Александр Сергеевич – аспирант.