

Основные технические характеристики КАБ-10 представлены в таблице.

Таблица

Масса	до 8кг
Длина	720 мм
Размах крыла	480мм
Масса боевой части	до 5 кг
Высота применения	(200-600) м

ЛИТЕРАТУРА

1. Динамика летательных аппаратов в атмосфере. Термины и определения. ГОСТ 20058-80.
2. Распопов В.Я. Микромеханические приборы. – М.: Машиностроение, 2007 – 400с.
3. Филатов Ю.В. Волоконно-оптический гироскоп: Учеб. пособие. СПб.: Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2003 - 234с

УДК 004.8

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ УЗБЕКИСТАНА НА ОСНОВЕ НЕЧЁТКОЙ ЛОГИКИ

Б.Ш. УСМОНОВ, К.И. УСМАНОВ

Ташкентский химико-технологический институт
Ташкент, Узбекистан

Аннотация. Современное сельское хозяйство всё активнее внедряет инновации в области интеллектуального земледелия, включая использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Эти устройства объединяют информационно-коммуникационные системы, робототехнику, искусственный интеллект, большие данные и Интернет вещей. Особое внимание уделяется системам управления: переход от классических PID-регуляторов к интеллектуальным методам (нечёткая логика, ANFIS, гибридные контроллеры) позволяет существенно повысить точность выполнения аграрных операций, устойчивость к климатическим возмущениям и эффективность использования ресурсов.

Введение. Рост населения Земли и изменение климатических условий создают новые вызовы для агропромышленного комплекса. По оценкам экспертов, к 2050 году потребуется на 70 % больше продовольствия, чем сегодня. Одним из решений становится переход к интеллектуальному земледелию, которое сочетает в себе автоматизацию, робототехнику, информационно-коммуникационные технологии (ИКТ), большие данные, интернет вещей и искусственный интеллект. Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) рассматриваются как важнейший инструмент цифровой трансформации аграрного сектора. Их преимущества заключаются в высокой точности выполнения задач, простоте эксплуатации и сравнительно низкой стоимости. Сельскохозяйственные дроны уже применяются для широкого круга задач: от мониторинга и картографирования посевных площадей до обработки полей удобрениями и средствами защиты растений. Однако, несмотря на высокую производительность, остаются нерешенными вопросы, связанные с временем автономной работы, эффективностью аккумуляторов и полезной нагрузкой. Для устранения этих ограничений необходимо развивать новые материалы, усовершенствованные сенсоры, системы позиционирования и интеллектуальные методы управления.

Особое внимание в последние годы уделяется применению нечёткой логики и гибридных интеллектуальных контроллеров (FLC, ANFIS, ANFIS-PID). В отличие от классических PID-регуляторов, такие подходы позволяют учитывать неопределённость сельскохозяйственной среды (ветровые возмущения, вариации нагрузки, погодные факторы) и обеспечивать высокую устойчивость полёта. Применение нечёткой логики в управлении БПЛА демонстрирует значительное снижение перерегулирования, сокращение времени установления и устранение статической ошибки, что напрямую повышает эффективность использования беспилотных систем в аграрной отрасли Узбекистана.

Применение БПЛА в аграрном секторе Узбекистана

В рамках исследования были рассмотрены основные направления внедрения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в практику сельского хозяйства Узбекистана:

Агромониторинг и картографирование. С помощью мультиспектральных и тепловизионных датчиков выполнялась диагностика состояния посевов, определялись зоны дефицита влаги и возможные очаги заболеваний растений, что показано на рис. 1.

Внесение удобрений и средств защиты растений. Беспилотные платформы оснащались резервуарами объёмом 10–15 литров и специальными распылительными форсунками, что обеспечивало равномерное распределение растворов по площади поля, как видно на рис. 2.

Посев семян и локальные операции. Дроны использовались для точечной посадки зерновых культур и хлопчатника в зонах, куда затруднён доступ традиционной техники, что иллюстрируется на рис. 3.

Анализ урожайности и прогнозирование. Полученные данные обрабатывались с применением геоинформационных технологий (ArcGIS), что позволяло строить цифровые тепловые карты продуктивности и заранее оценивать ожидаемый урожай, пример чего приведён на рис. 4.

Интеллектуальные методы управления: нечёткая логика

Для повышения устойчивости и точности работы беспилотных летательных аппаратов в условиях сельского хозяйства были применены методы интеллектуального управления, основанные на принципах нечёткой логики. Такой подход позволяет учесть неопределённость окружающей среды — колебания скорости ветра, изменение массы полезной нагрузки, нестабильность сенсоров.

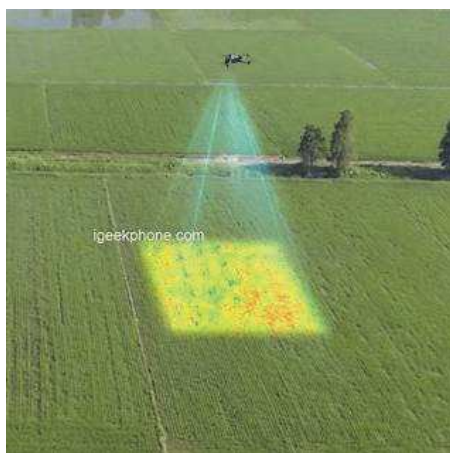


Рис. 1. Агромониторинг посевов с использованием мультиспектральных датчиков на БПЛА

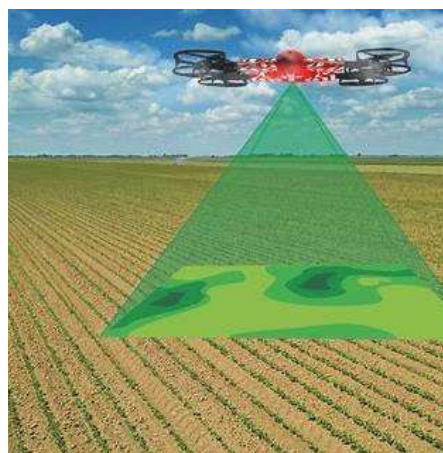


Рис. 2. Опрыскивание сельскохозяйственных культур беспилотным аппаратом



Рис. 3. Посев семян и выполнение локальных операций с помощью дрона

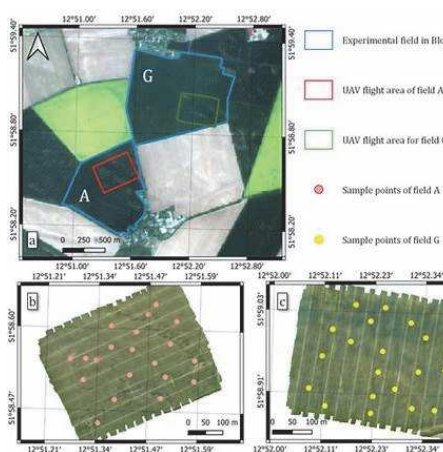


Рис. 4. Анализ урожайности и построение цифровых карт в ГИС-системе (ArcGIS)

Формирование нечётких переменных. В качестве входных параметров системы управления рассматривались ошибка курса и скорость изменения ошибки. Для каждой из переменных задавались пять функций принадлежности: *NB* (сильно отрицательное значение), *NS* (отрицательное), *ZE* (нулевое), *PS* (положительное) и *PB* (сильно положительное).

Создание базы правил IF–THEN. Управляющие воздействия определялись с помощью набора логических правил вида «ЕСЛИ–ТО». ЕСЛИ ошибка большая отрицательная и её производная также отрицательная, ТО управляющий сигнал принимается как положительный большой.

ЕСЛИ ошибка равна нулю и её изменение близко к нулю, ТО управляющее воздействие устанавливается как нулевое. Всего было реализовано 25 правил.

База правил (25 штук):

1. ЕСЛИ $e = NB$ И $de = NB$, ТО $u = NB$
2. ЕСЛИ $e = NB$ И $de = NS$, ТО $u = NB$
3. ЕСЛИ $e = NB$ И $de = ZE$, ТО $u = NB$
4. ЕСЛИ $e = NB$ И $de = PS$, ТО $u = NS$
5. ЕСЛИ $e = NB$ И $de = PB$, ТО $u = ZE$
6. ЕСЛИ $e = NS$ И $de = NB$, ТО $u = NB$
7. ЕСЛИ $e = NS$ И $de = NS$, ТО $u = NS$
8. ЕСЛИ $e = NS$ И $de = ZE$, ТО $u = NS$
9. ЕСЛИ $e = NS$ И $de = PS$, ТО $u = ZE$
10. ЕСЛИ $e = NS$ И $de = PB$, ТО $u = PS$
11. ЕСЛИ $e = ZE$ И $de = NB$, ТО $u = NB$
12. ЕСЛИ $e = ZE$ И $de = NS$, ТО $u = NS$
13. ЕСЛИ $e = ZE$ И $de = ZE$, ТО $u = ZE$
14. ЕСЛИ $e = ZE$ И $de = PS$, ТО $u = PS$
15. ЕСЛИ $e = ZE$ И $de = PB$, ТО $u = PB$
16. ЕСЛИ $e = PS$ И $de = NB$, ТО $u = NS$
17. ЕСЛИ $e = PS$ И $de = NS$, ТО $u = ZE$
18. ЕСЛИ $e = PS$ И $de = ZE$, ТО $u = PS$
19. ЕСЛИ $e = PS$ И $de = PS$, ТО $u = PS$
20. ЕСЛИ $e = PS$ И $de = PB$, ТО $u = PB$
21. ЕСЛИ $e = PB$ И $de = NB$, ТО $u = ZE$
22. ЕСЛИ $e = PB$ И $de = NS$, ТО $u = PS$
23. ЕСЛИ $e = PB$ И $de = ZE$, ТО $u = PB$
24. ЕСЛИ $e = PB$ И $de = PS$, ТО $u = PB$
25. ЕСЛИ $e = PB$ И $de = PB$, ТО $u = PB$

Компьютерное моделирование. Для проверки корректности предложенной системы был построен регулятор в среде *MATLAB/Simulink*

с использованием пакета *Fuzzy Logic Toolbox*. Структурная схема модели управления представлена на рис. 5.

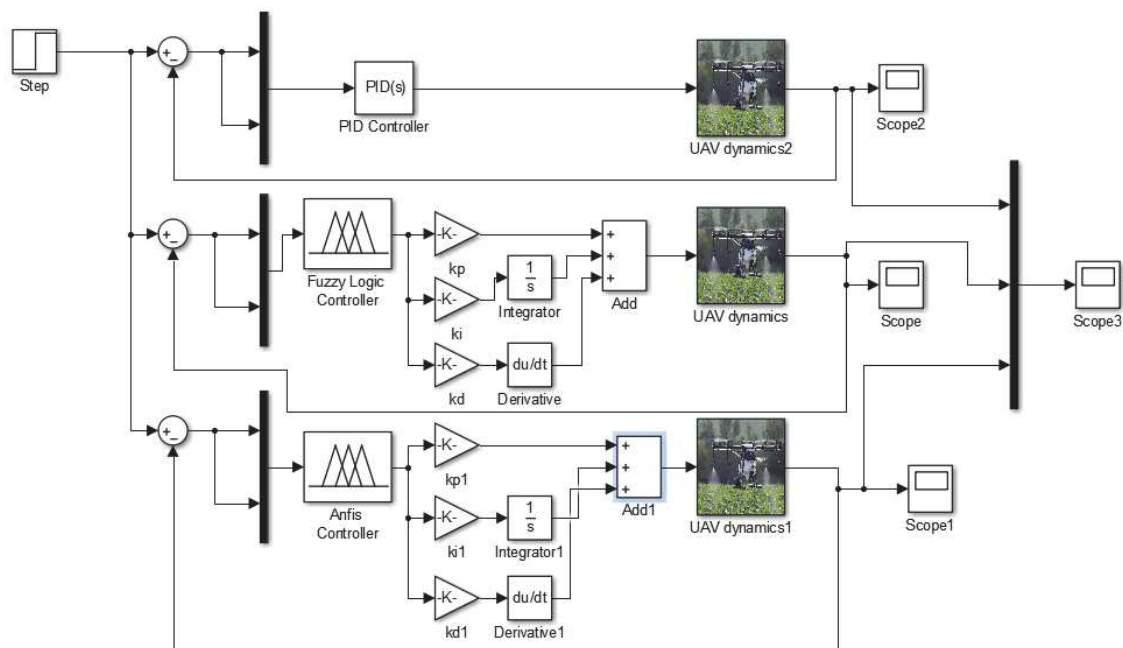


Рис.5. Сравнительная структурная схема управления БПЛА с использованием PID, Fuzzy-PID и ANFIS-PID регуляторов

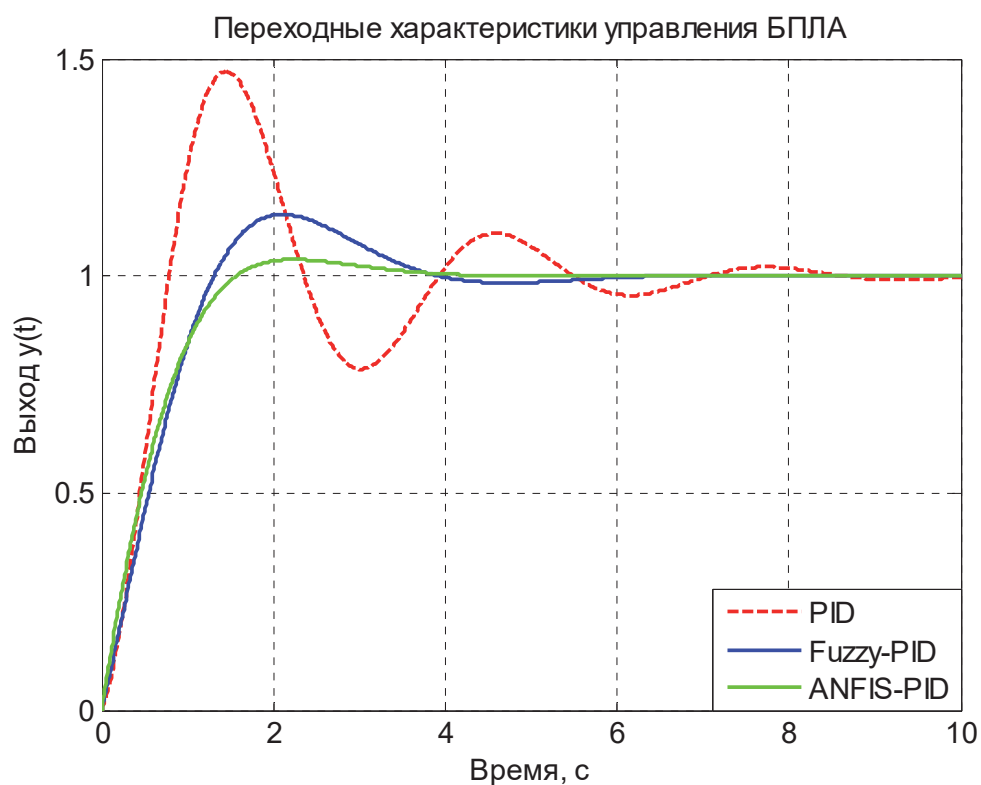


Рис.6. Сравнение переходных характеристик системы управления БПЛА при использовании PID, Fuzzy-PID и ANFIS-PID регуляторов

На рис. 6 представлены переходные характеристики системы управления БПЛА при использовании различных алгоритмов регулирования. **PID-регулятор (красная линия)** демонстрирует значительное перерегулирование (около 50 %) и увеличенное время установления. Это снижает точность стабилизации и приводит к колебательному процессу. **Fuzzy-PID (синяя линия)** показывает более плавный характер перехода: перерегулирование уменьшается, а система быстрее достигает установившегося значения. **ANFIS-PID (зелёная линия)** обеспечивает наилучшие показатели: отсутствует статическая ошибка, минимальное время установления и практически полное отсутствие колебаний.

Заключение. В работе рассмотрены основные направления применения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в сельском хозяйстве Узбекистана и показана эффективность интеллектуальных методов управления. Классические PID-регуляторы продемонстрировали ограничения в условиях неопределённости, в то время как использование нечёткой логики и гибридных алгоритмов (ANFIS-PID) позволило снизить перерегулирование, сократить время переходного процесса и устранить статическую ошибку. Компьютерное моделирование в MATLAB/Simulink подтвердило, что ANFIS-PID обеспечивает лучшие динамические характеристики.

Таким образом, интеграция БПЛА с интеллектуальными регуляторами создаёт условия для развития точного земледелия в Узбекистане, повышая эффективность производства и снижая затраты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Saltık, I., Leblebicioğlu, K., Güzelkaya, M., Eksin, İ. (2017). *Hybrid Fuzzy-PI Control for UAV Dynamics*. *Applied Soft Computing*, 52, 560–573.
2. Zadeh, L.A. (1965). *Fuzzy Sets*. *Information and Control*, 8(3), 338–353.
3. Jang, J.-S.R. (1993). *ANFIS: Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System*. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 23(3), 665–685.
4. Ross, T.J. (2010). *Fuzzy Logic with Engineering Applications*. John Wiley & Sons.
5. MATLAB & Simulink Documentation. *Fuzzy Logic Toolbox*. MathWorks, 2023.