

## **ОБЗОР ТЕХНОЛОГИЙ УПРАВЛЕНИЯ ПОЛЕТОМ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

**Гу Пэнхао**

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

Линейно-квадратичный регулятор (LQR) основан на модели в пространстве состояний. Путем решения уравнения Риккати он находит оптимальную матрицу обратной связи по состоянию, что позволяет минимизировать функционал, учитывающий, как точность управления, так и затраты энергии. Однако LQR предъявляет высокие требования к точности модели и обладает ограниченной робастностью

Модельно-прогнозирующее управление (MPC) решает задачу оптимизации на конечном горизонте времени в реальном времени, что позволяет явным образом учитывать ограничения системы. MPC демонстрирует высокую эффективность в задачах траекторного слежения и обхода препятствий.

Управление со скользящим режимом (SMC) обеспечивает полную робастность к параметрическим возмущениям и внешним воздействиям за счет принуждения системы к движению вдоль специально сконструированной поверхности скольжения. Комбинация SMC с наблюдателями возмущений эффективно подавляет нежелательные эффекты, обеспечивая точность позиционирования в заданных пределах при изменяющейся нагрузке.

Нейросетевые регуляторы используют аппроксимирующие способности нейронных сетей для изучения обратной динамики БПЛА или прямой карты управляющих сигналов без необходимости точной модели. Гибридные ANN-ПИД регуляторы, динамически настраивающие коэффициенты ПИД-регулятора с помощью нейронной сети, демонстрируют снижение установившейся ошибки по сравнению с классическим в нелинейных средах.

Глубокое обучение с подкреплением (Deep RL) позволяет БПЛА обучаться оптимальным стратегиям управления в процессе взаимодействия со средой. Гибридные архитектуры, объединяющие обученные алгоритмы с классическими методами, способны решать сложные задачи в незнакомых условиях.

Нечеткое управление трансформирует экспертные знания в нечеткие правила, что удобно для работы с неопределенностью и качественной информацией. Адаптивные нечеткие регуляторы, оптимизируемые эволюционными алгоритмами, могут подстраивать параметры управления в реальном времени.