

УДК 62-526

МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМАМИ СТАБИЛИЗАЦИИ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Савелов П. И., Щавлев А. А.

*РУП «НПЦ multifunctionальных беспилотных комплексов» НАН Беларуси,
Минск, Беларусь*

Аннотация. Работа систематизирует и сравнивает методы управления трехосевой гиросtabilизированной платформой оптико-электронной системы БПЛА на бесколлекторных электродвигателях. Рассматриваются ПИД-, линейно-квадратичное (LQR), H_∞ , модельно-прогнозирующее (MPC), нечеткое и адаптивное управление. Сравнение выполнено по метрикам линии визирования (СКО и пиково-пиковая ошибка), запасам устойчивости, вычислительным затратам, требованиям к модели и робастности к вибрациям. Предложена процедура выбора, включающая частотную идентификацию, формулирование требований и матрицу решений с учетом ограничений по массе, энергии и тепловому режиму.

Ключевые слова: гиросtabilизированная платформа; оптико-электронная система; стабилизация линии визирования; алгоритмы управления; беспилотный летательный аппарат.

CONTROL METHODS FOR ELECTRO-OPTICAL STABILIZATION SYSTEMS OF UNMANNED AERIAL VEHICLES

Savelov P., Shchavlev A.

RUE “SPC of Multifunctional Unmanned Systems” NAS of Belarus, Minsk, Belarus

Abstract. The paper systematizes and compares control methods for a three-axis gyro-stabilized electro-optical platform of a UAV driven by brushless motors. It examines PID, linear-quadratic (LQR), H_∞ , model predictive (MPC), fuzzy, and adaptive control methods. The comparison is carried out using line-of-sight metrics (RMS and peak-to-peak error), stability margins, computational load, model requirements, and robustness to vibrations. A selection procedure is proposed, including frequency-domain identification, requirement formulation, and a decision matrix considering mass, power, and thermal constraints.

Keywords: gyro-stabilized gimbal; electro-optical system; line-of-sight stabilization; control algorithms; unmanned aerial vehicle.

*Адрес для переписки: Савелов П. И., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: savelov2205@gmail.com*

В настоящее время беспилотные летательные аппараты (БПЛА) широко используются для всевозможных задач мониторинга, инспекций объектов инфраструктуры, картографирования, экологических наблюдений, решение которых реализуется при помощи аэрофото и видео съемки. Ключевым элементом получения видеоинформации являются гиросtabilизированные оптико-электронные системы (ГОЭС).

Типовая конструкция ГОЭС – гиросtabilизированная трехосевая платформа с карданной кинематикой, приводимая в движение бесколлекторными электродвигателями. В состав измерительного контура ГОЭС входят инерциальные датчики (трехосевые гироскопы и акселерометры). Задача закона управления формулируется как подавление угловых скоростей корпуса и компенсация квазистационарных дрейфов ориентации при учете ограничений на исполнительные приводы. При этом необходимо обеспечить заданные показатели качества стабилизации линии визирования (ЛВ) в рабочей полосе частот.

Цель данной работы является оптимизация выбора метода управления системой стабилизации гиросtabilизированных оптико-электронных систем.

ПИД-регулятор является наиболее распространенным алгоритмом систем стабилизации. Он формирует управляющий сигнал как сумму

трех компонентов: пропорциональной (П), интегральной (И) и дифференциальной (Д) частей ошибки системы (разницы между заданным и измеренным сигналом). Преимущество ПИД-регуляторов – возможность удобной настройки по известным эмпирическим или оптимизационным методам [1].

Линейно-квадратичный регулятор (LQR) – метод оптимального управления для линейных систем с квадратичной функцией качества. В этом подходе стоимость задается как сумма квадратов отклонений переменных состояния и управляющих воздействий, а обратная связь по состоянию синтезируется таким образом, чтобы минимизировать эту функцию «затрат» [2]. Эффективность LQR может оказаться недостаточной в сложных многопараметрических системах или при выраженных нелинейностях, где преимущество получают робастные или адаптивные методы.

Методы синтеза H_∞ направлены на обеспечение гарантированной устойчивости и требуемой производительности системы при наличии неопределенностей. При этом задача оптимизации формулируется по принципу «худшего случая»: контроллер выбирают таким образом, чтобы воздействие наибольшего возмущения на выход системы было минимальным. Основным недостатком методов H_∞ – высокая сложность синтеза и жесткие требования к точности модели объекта. Кроме

того, оптимизация ведется по выбранному критерию, который не всегда согласуется с интуитивно понятными показателями качества системы (например, временем переходного процесса).

Тем не менее H_∞ регуляторы в гиросtabilизированных платформах обеспечивают высокую робастность при неопределенностях параметров и внешних возмущениях, что критично для оптико-электронных систем, функционирующих в динамических условиях съемки [3].

Модельно-прогнозирующее управление (МРС) – современный метод управления, учитывающий предсказанное поведение системы. По заданной модели МРС предсказывает выходы системы на некотором горизонте и решает задачу оптимизации управления в каждый момент времени. При этом на каждом шаге реализуется только первая часть найденного оптимального управляющего воздействия, после чего процесс повторяется. МРС явно учитывает динамику системы и позволяет предсказывать влияние будущих изменений (например, предстоящих рывков или резких ускорений). Главный недостаток метода – высокие вычислительные требования для решения оптимизационной задачи в режиме реального времени, особенно если модель нелинейна и горизонт предсказания велик. Тем не менее в последние годы МРС активно внедряется благодаря росту вычислительных возможностей и появлению специализированных процессоров для быстрого решения задач оптимизации [4].

Нечеткие регуляторы используют теорию нечетких множеств для управления без явной математической модели. Входные сигналы (такие как ошибка и ее производная) преобразуются в лингвистические термины (например, «большая отрицательная ошибка», «малая ошибка»), после чего через систему правил формируется управляющий сигнал. Формальным вариантом является система Такэби-Сугэно-Канга (TSK), где правила задают выходные функции.

Преимуществом нечетких регуляторов является возможность интуитивного описания правил управления на языке эксперта, что упрощает разработку контроллера при сложной динамике объекта. Такой регулятор «анализирует» аналоговый вход при помощи логических переменных с непрерывными значениями от 0 до 1 [5].

Адаптивные алгоритмы автоматически изменяют свои параметры для компенсации изменений характеристик объекта или внешних условий. Например, в MRAC (Model Reference Adaptive

Control) задается эталонная модель желаемого поведения, и параметры регулятора настраиваются таким образом, чтобы поведение системы максимально совпадало с этой моделью [6]. Таким образом, адаптивные регуляторы целесообразно применять в ситуациях, где параметры объекта заранее неизвестны или меняются, а требования к точности управления высоки.

При этом важно обеспечить условия сходимости алгоритма и отсутствие устойчиво направленных возмущений. Кроме того, для любого метода управления необходима предварительная частотная идентификация (включая измерение резонансов по осям и оценку спектров помех и шумов) и периодическая переоценка модели объекта – обязательные этапы перед выбором и оптимизацией управляющего закона.

На практике именно согласованность динамических звеньев, качество датчиков и алгоритмов фильтрации, а также корректная настройка контуров управления определяют реальный результат. В этой связи целесообразно сочетать классические и современные методы – например, использовать ПИД-регулятор в сочетании с модельно-прогнозирующим или адаптивным контуром для компенсации внешних возмущений и параметрических дрейфов.

Основной задачей дальнейших исследований является создание единой методики оценки эффективности алгоритмов стабилизации на основе экспериментальных данных с реальных платформ. Разработка такой методики позволит повысить достоверность выбора управляющего закона, ускорить этап верификации и повысить надежность работы оптико-электронных систем в составе беспилотных комплексов.

Литература

1. Бесекерский, В. А. Теория систем автоматического управления / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. – СПб.: Профессия, 2004. – 747 с.
2. Брайсон, А. Прикладная теория оптимального управления / А. Брайсон, Ю.-Ши. Хо. – М.: Мир, 1972. – 544 с.
3. Поляк, Б. Т. Робастная устойчивость и управление / Б. Т. Поляк, П. С. Щербаков. – М.: Наука, 2002. – 303 с.
4. Деменков, Н. П. Управление с прогнозированием: учеб. пособие / Н. П. Деменков. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2020. – 66 с.
5. Леоненков, А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / А. В. Леоненков. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 736 с.
6. Фомин, В. Н. Адаптивное управление динамическими объектами / В. Н. Фомин, А. Л. Фрадков, В. А. Якубович. – М.: Наука, 1981. – 447 с.