

Соколов Олег Аркадьевич

Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации им. Главного
маршала авиации А.А. Новикова

Шлыков Кирилл Николаевич

Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации им. Главного
маршала авиации А.А. Новикова

Молчанов Даниил Вячеславович

Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации им. Главного
маршала авиации А.А. Новикова

Экономическая оценка применения автоматизированной системы безопасного завершения полета БПЛА при обрыве волоконно-оптического канала связи

Аннотация. В статье рассматривается задача синтеза алгоритмов автоматического управления беспилотным летательным аппаратом (БПЛА) при аварийном обрыве волоконно-оптического канала связи между бортом и станцией внешнего пилота (СВП). Предложена архитектура автоматизированной системы безопасного завершения полета (СБЗП), которая постоянно функционирует в составе бортового автопилота и сочетает робастный регулятор на основе линейно-квадратичного закона (LQR) для стабилизации движения и адаптивный контур с эталонной моделью (MRAC) для компенсации скачкообразного изменения массо-инерционных характеристик аппарата после аварийного сброса катушки с остатками оптического волокна. Сформулирован алгоритм обнаружения обрыва канала связи по интегральной мощности оптического сигнала. Проведено математическое моделирование продольного движения БПЛА в среде MATLAB/Simulink, подтверждающее эффективность предложенного комбинированного закона управления. Дополнительно предложена компактная экономическая модель оценки эффекта применения СБЗП через сокращение ожидаемого ущерба при аварийном завершении полета, что повышает экономическую целесообразность эксплуатации БПЛА с волоконно-оптическим каналом связи при мониторинге протяженных объектов.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, волоконно-оптический канал связи, безопасное завершение полета, LQR-регулятор, адаптивное управление, MRAC, экономическая эффективность, ожидаемый ущерб

Sokolov Oleg Arkadievich

St. Petersburg State University of Civil Aviation named after A.A. Novikov

Shlykov Kirill Nikolaevich

St. Petersburg State University of Civil Aviation named after A.A. Novikov

Molchanov Daniil Vyacheslavovich

St. Petersburg State University of Civil Aviation named after A.A. Novikov

Automated System for Safe Flight Termination of an Unmanned Aerial Vehicle in Case of Fiber-Optic Communication Link Failure

Abstract. The paper addresses the synthesis of automatic control algorithms for an unmanned aerial vehicle (UAV) in the event of a fiber-optic communication link failure between the aircraft and the external pilot station. An architecture of an automated safe flight termination system is proposed, which operates continuously within the onboard autopilot and combines a robust LQR controller for stabilization with an adaptive MRAC loop compensating for the step-like change of mass and inertia caused by the emergency release of the fiber-optic cable spool.

An algorithm for detecting link failure based on the integral optical signal power is formulated. Mathematical simulation of the UAV longitudinal motion in MATLAB/Simulink confirms the efficiency of the combined control law. A compact economic model of the system effect is also proposed, expressed as the reduction of expected losses caused by emergency flight termination, which improves the economic feasibility of operating UAVs with a fiber-optic link for monitoring extended infrastructure objects.

Keywords: unmanned aerial vehicle, fiber-optic communication link, safe flight termination, LQR controller, adaptive control, MRAC, economic efficiency, expected loss.

Введение

Специализированные беспилотные воздушные суда (БВС – далее), применяемые для контроля протяженных объектов (линий электропередачи, магистральных трубопроводов, транспортных коридоров), все чаще используют волоконно-оптический канал связи между аппаратом и станцией внешнего пилота (СВП) [1–3]. Канал обладает высокой устойчивостью к радиоэлектронным помехам и обеспечивает надежную передачу больших объемов телеметрии и видеoinформации в режиме реального времени.

Вместе с тем механический обрыв оптического волокна относится к числу наиболее опасных отказов, поскольку после потери канала связи СВП фактически утрачивает возможность дальнейшего управления аппаратом [2, 5]. В этом случае бортовая система автоматического управления должна самостоятельно перевести БВС в режим безопасного завершения полета.

Стандартные алгоритмы аварийного возврата ориентированы на заранее заданный сценарий и, как правило, не учитывают изменение динамики движения аппарата после потери связи [1, 3–5]. При обрыве линии связи требуется аварийный сброс катушки с остатками волокна, что приводит к скачкообразному изменению массы и моментов инерции аппарата. Если эти изменения не компенсировать, ухудшается качество переходного процесса, а на этапе снижения возрастает риск отклонения от расчетной траектории, особенно при наличии внешних возмущений.

Задача безопасного завершения полета, конечно, имеет выраженный экономический смысл. Полная потеря БПЛА вместе с полезной нагрузкой и волоконно-оптической катушкой ведет к значительному прямому ущербу и к косвенным расходам на поиск, эвакуацию и простой работ по мониторингу. Применение системы, повышающей вероятность сохранения аппарата при аварийном обрыве канала связи, снижает ожидаемый ущерб и повышает экономическую целесообразность эксплуатации БПЛА с волоконно-оптическим каналом.

В работе предлагаем архитектуру автоматизированной системы безопасного завершения полета (СБЗП – далее), функционирующей в составе бортового автопилота и сочетающей робастный LQR-регулятор стабилизации с адаптивным контуром MRAC, компенсирующим изменение «массо-инерционных» характеристик после аварийного сброса катушки. Дополнительно формулируется компактная экономическая модель оценки эффекта применения системы.

Постановка задачи

Рассматривается задача формирования законов управления для бортовой системы автоматического управления БВС, обеспечивающих безопасное завершение полета после обрыва волоконно-оптического канала связи с СВП. Архитектура управления будет из двух контуров. Первый контур обеспечивает удержание аппарата в устойчивом режиме движения и по текущим отклонениям состояния рассчитывает управляющее воздействие для возврата на заданную пространственно-временную траекторию (ПВТ) [4, 5]. Второй контур подстраивает управление после сброса катушки, когда у аппарата изменяются масса и инерционные характеристики. СБЗП рассматривается как штатная подсистема автопилота. Обрыв канала связи выступает событием, переводящим систему к новой цели управления: от удержания исходной ПВТ к безопасному снижению и посадке [2, 4, 5].

Математическая модель изменения массы и инерционных характеристик БПЛА

При потере связи выполняется аварийный сброс катушки с остатками волокна. Сброс необходим для исключения наматывания кабеля на силовую установку и снижения риска зацепа за внешние объекты. После сброса масса и моменты инерции аппарата изменяются скачкообразно. Из-за этого исходные параметры модели перестают соответствовать реальному состоянию БВС. Принимается, что изменение происходит в момент времени t_s и носит ступенчатый характер. Тогда масса и момент инерции записываются в виде:

$$m(t) = m_0 - \Delta m \cdot \theta(t - t_s)$$
$$J(t) = J_0 - \Delta J \cdot \theta(t - t_s)$$

где m_0 и J_0 - масса и момент инерции БВС до сброса катушки; $m(t)$ и $J(t)$ - текущие значения этих параметров; Δm и ΔJ - величины скачкообразного изменения массы и момента инерции; $\theta(t - t_s)$ - функция Хевисайда, равная нулю при $t < t_s$ и единице при $t \geq t_s$; t_s - момент аварийного сброса катушки. Масса катушки с остатками оптического волокна может составлять 10-15 % массы пустого аппарата, поэтому сброс не может рассматриваться как малое возмущение.

В моделировании для аппарата массой 15 кг величина Δm принята равной 2 кг.

Алгоритм обнаружения обрыва волоконно-оптического канала связи

Обнаружение обрыва канала основано на анализе мощности оптического сигнала, передаваемого по волокну. В обычном режиме сигнал имеет стабильные характеристики, а обрыв проявляется как резкое падение или полное исчезновение оптической мощности. Момент обрыва T определяется как самый первый момент времени, в который интегральная мощность сигнала за скользящее временное окно τ опускается ниже заданного порогового значения W :

$$T = \min \left\{ t \int_{t-\tau}^t |S(\xi)|^2 d\xi < W \right\}$$

где $s(\xi)$ - текущее значение оптического сигнала; τ - длительность временного окна интегрирования; W - пороговое значение мощности, определяемое экспериментально как минимально допустимое для корректной работы канала связи.

Условие обеспечивает оперативное обнаружение обрыва и используется как триггер для активации процедуры безопасного завершения полета. Схема СБЗП приведена на рис. 1.

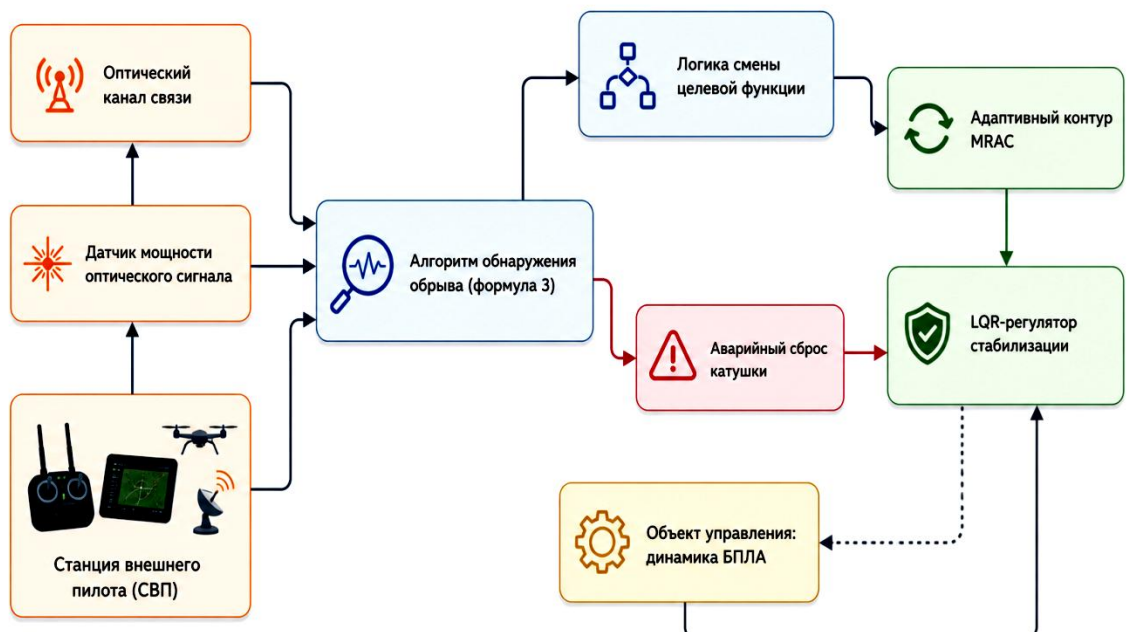


Рис. 1 – Структурная схема СБЗП БАС

Комбинированный закон управления: LQR и MRAC

Для удержания БВС в заданном режиме полета используется линейная модель пространства состояний:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t)$$

где $x(t)$ - вектор состояния БВС, включающий пространственное положение и угловые координаты; $u(t)$ - вектор управляющих воздействий, формируемый автопилотом; A - матрица динамики аппарата; B - матрица управления, отражающая влияние управляющих воздействий на изменение состояния. Параметры регулятора выбираем из условия минимизации квадратичного функционала качества:

$$J = \int_0^{\infty} (X^T(Qx(t) + U^T(t)Ru(t)))dt$$

где Q - положительно полуопределенная матрица весов ошибок по состоянию; R - положительно определенная матрица весов управляющих воздействий, ограничивающая чрезмерную активность исполнительных органов. Веса в матрице Q выбираются неравномерно: наибольшие значения присваиваются угловым отклонениям и вертикальной скорости. Оптимальная обратная связь определяется через решение алгебраического уравнения Риккати:

$$A^TP + PA - PBR^{-1}B^TP + Q = 0$$

где P - симметричная положительно определенная матрица. Матрица коэффициентов регулятора и закон управления в виде линейной обратной связи по состоянию имеют вид:

$$K = R^{-1}B^TP$$

$$u_{LQR}(t) = -Kx(t)$$

Сброс катушки изменяет матрицу динамики движения БАС A и нарушает оптимальность настройки для нового состояния аппарата. Для сохранения эталонного качества переходного процесса используется адаптивный контур с эталонной моделью (MRAC), формирующий дополнительное управляющее воздействие:

$$u_{MRAC}(t) = \theta_1(t)x(t) + \theta_2(t)r(t)$$

где $r(t)$ - вектор эталонного сигнала задания; $\theta_1(t)$ и $\theta_2(t)$ - матрицы адаптивных параметров, изменяющиеся во времени по градиентному правилу адаптации (правилу MIT) и компенсирующие отклонения динамики объекта от эталонной модели. Результирующее управление формируется как сумма базового LQR-закона и адаптивной добавки:

$$u(t) = u_{LQR}(t) + u_{MRAC}(t)$$

Экономическая интерпретация применения СБЗП

Внедрение СБЗП имеет непосредственно экономическое значение. Полная потеря БПЛА сопровождается ущербом, включающим стоимость самого аппарата, стоимость полезной нагрузки и волоконно-оптической катушки, расходы на поиск и эвакуацию обломков, а также упущенную выгоду от простоя работ по мониторингу. Применение СБЗП потенциально повысит вероятность безопасного снижения и сохранения как самой БАС, так и её полезной нагрузки. Для компактной количественной оценки эффекта предлагаем следующую модель ожидаемого экономического эффекта от применения СБЗП:

$$E_{econ} = P_{av} \cdot (C_{loss} - C_{save}) - C_{impl}$$

где $E_{econ}(E_{экон})$ - ожидаемый годовой экономический эффект применения СБЗП в расчете на один аппарат; $P_{av}(P_{ав})$ - вероятность аварийного события, связанного с обрывом волоконно-оптического канала, за расчетный период; $C_{loss}(C_{пот})$ - ожидаемые затраты при полной потере БПЛА и полезной нагрузки в случае отсутствия СБЗП (стоимость аппарата, нагрузки, катушки, расходы на поиск и эвакуацию, упущенная выгода от простоя);

$C_{save}(C_{сохр})$ - ожидаемые затраты при безопасном завершении полета и сохранении аппарата (плановое обслуживание после аварийной посадки, диагностика, замена катушки); $C_{impl}(C_{вн})$ - приведенные затраты на внедрение программно-аппаратного решения СБЗП в автопилот за тот же период. Положительное значение $E_{экон}$ указывает на экономическую целесообразность внедрения СБЗП. При характерной для данного класса задач вероятности аварии порядка 10^{-2} за полет ожидаемая разность затрат $C_{пот} - C_{сохр}$ существенно превосходит приведенные затраты $C_{вн}$ на программную доработку автопилота, поскольку $C_{вн}$ носит разовый характер и распределяется на весь парк аппаратов одной модели. Конкретные числовые значения зависят от стоимости аппарата, нагрузки и тарифов эксплуатанта.

Результаты математического моделирования

Для оценки эффективности предложенной СБЗП проведено математическое моделирование продольного движения БВС в среде MATLAB/Simulink. Параметры модельного БПЛА самолетного типа: размах крыла 3,2 м; масса до сброса катушки 15 кг, после сброса - 13 кг; тяговооруженность 0,4. Сценарий: обрыв канала на 50-й секунде полета, обнаружение, переключение целевой функции на снижение по глиссаде, аварийный сброс катушки массой 2 кг на 52-й секунде.

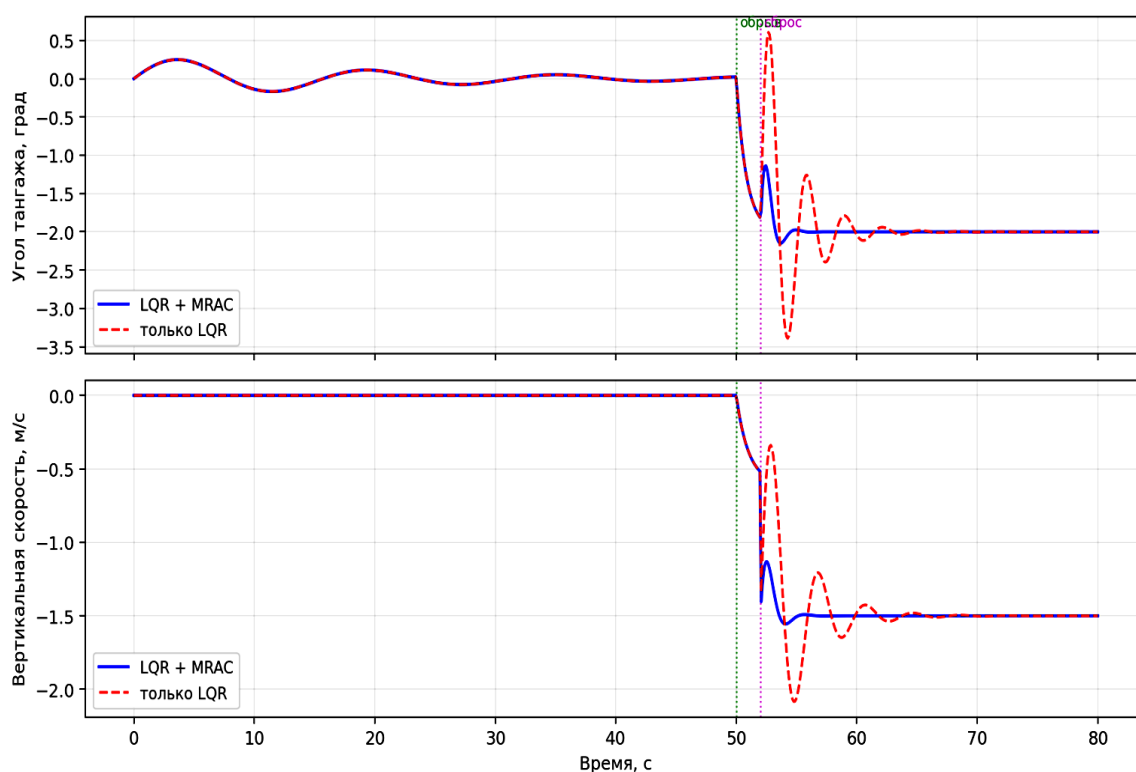


Рис. 2 – Переходные процессы продольного движения

Анализ переходных процессов показывает, что комбинированный закон управления LQR + MRAC обеспечивает более плавное и более быстрое восстановление режима снижения по сравнению с регулированием с фиксированными настройками. Отклонения по углу тангажа и вертикальной скорости уменьшаются примерно в 2-3 раза быстрее, отклонение от расчетной траектории снижения не превышает трех метров.

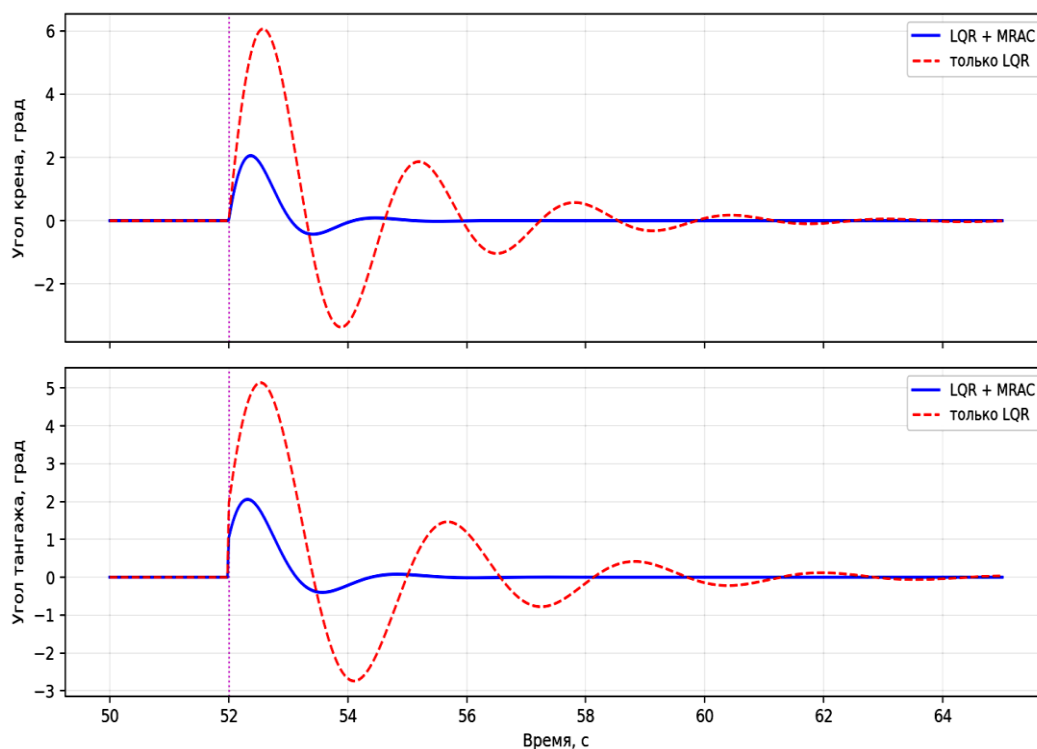


Рис. 3 – Реакция пилотажных параметров БВС после сброса катушки

Колебания углов крена и тангажа, возникающие из-за изменения момента инерции, затухают за 2-3 секунды.

Заключение

Предложена архитектура автоматизированной системы безопасного завершения полета БПЛА при обрыве волоконно-оптического канала связи. Система функционирует в составе бортового автопилота и сочетает робастный LQR-регулятор для стабилизации движения с адаптивным контуром MRAC, компенсирующим скачкообразное изменение массы и моментов инерции после аварийного сброса катушки. Сформулирован алгоритм обнаружения обрыва канала по интегральной мощности оптического сигнала. Математическое моделирование в MATLAB/Simulink показало быстрое затухание возмущений и удержание расчетной траектории снижения. Предложена компактная экономическая модель оценки эффекта применения системы через сокращение ожидаемого ущерба от полной потери аппарата и полезной нагрузки. Это в перспективе повысит экономическую целесообразность эксплуатации БВС с волоконно-оптическим каналом связи.

Список источников

1. Лебедев А. А., Чернобровкин Л. С. Динамика полета беспилотных летательных аппаратов: учебное пособие для вузов / под ред. А. А. Лебедева. - 2-е изд., перераб. и доп. - Москва: Машиностроение, 1973. - 615 с.
2. Современные информационные технологии в задачах навигации и наведения беспилотных маневренных летательных аппаратов / [К. К. Веремеенко и др.]; под ред. М. Н. Красильщикова, Г. Г. Себрякова. - Москва: Физматлит, 2009. - 552 с.
3. Белов С. В., Гордиенко А. В., Проскурин В. Д. Аэродинамика и динамика полета: учебное пособие. - Оренбург: ОГУ, 2014. - 109 с.
4. Бобцов А. А. Адаптивное и робастное управление неопределенными системами по выходу. - Санкт-Петербург: Наука, 2011. - 173 с.
5. Теория автоматического управления. Ч. 2: Теория нелинейных и специальных систем автоматического управления: учебное пособие для вузов / Н. А. Бабаков, А. А.

Воронов, А. А. Воронова [и др.]; под ред. А. А. Воронова. - Москва: Высшая школа, 1977. - 288 с.

Сведения об авторах

Соколов Олег Аркадьевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой №13 «Системы Автоматизированного Управления», Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А. А. Новикова, Санкт-Петербург, Россия

Шлыков Кирилл Николаевич, студент 3 курса, Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А. А. Новикова, Санкт-Петербург, Россия.

Молчанов Даниил Вячеславович, студент 3 курса, Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А. А. Новикова, Санкт-Петербург, Россия.

Information about the authors

Oleg Arkadyevich Sokolov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Department No. 13 'Automated Control Systems', Saint Petersburg State University of Civil Aviation named after Chief Marshal of Aviation A. A. Novikov, Saint Petersburg, Russia

Shlykov Kirill Nikolaevich, 3rd year student, Saint Petersburg State University of Civil Aviation named after Chief Marshal of Aviation A. A. Novikov, Saint Petersburg, Russia.

Molchanov Daniil Vyacheslavovich, 3rd year student, Saint Petersburg State University of Civil Aviation named after Chief Marshal of Aviation A. A. Novikov, Saint Petersburg, Russia.