

МЕТОД ДИНАМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА КОЭФФИЦИЕНТОВ АДАПТИВНОГО LQR РЕГУЛЯТОРА В СОЧЕТАНИИ С ПИД-РЕГУЛЯТОРОМ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ МУЛЬТИРОТОРНЫМ БВС*Д.М. Волков¹, А.И. Савельев¹*¹Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Цель данной работы состоит в повышении надежности и стабильности системы управления беспилотным воздушным судном (СУ БВС) мультироторного типа на основе применения нового метода динамического LQR-синтеза коэффициентов усиления и формирования управляющих воздействий. Разработанный метод обеспечивает адаптацию в режиме реального времени СУ БВС к внешним воздействиям за счет динамически изменяемых весовых коэффициентов матриц стоимости Q и R , а также формируемых коэффициентов динамической модели БВС. Проведено сравнение синтезированного регулятора на базе разработанного метода с ПИД-регулятором, который широко применяется в современных БВС. Выявлено, что разработанный метод работает сравнительно лучше, показывая при определенных экспериментальных условиях процент корреляции выходного воздействия к желаемому угловому положению больше на 26 %, чем ПИД-регулятор со статическими коэффициентами. При этом временной интервал переходного процесса регуляции с использованием предлагаемого метода в среднем в 5 раз меньше, чем у рассматриваемого аналога.

Ключевые слова: LQR; LQ-регулятор; адаптивный LQR; адаптивный регулятор; адаптивный LQ-регулятор; СУ БВС.

Введение

В данной работе рассматривается система управления БВС, базирующаяся на адаптивном поведении алгоритма LQR (Linear Quadratic Regulator). БВС является динамической системой с внешними воздействиями, силу влияния которых предсказать заранее невозможно. Поэтому одной из основных задач СУ БВС в ходе процесса регуляции является своевременная адаптация к изменяющейся силе воздействия дестабилизирующих факторов. Решению данной задачи способствует настройка ряда статических параметров LQR, а также формирование значений адаптивных параметров LQR на основе динамически меняющихся параметров объекта управления. Исходя из вышеперечисленного, следует, что теоретико-множественное описание рассматриваемой системы должно включать в себя:

- 1) константные параметры LQR, представленные в виде набора параметров $LQ = \{LQ_i\}$, где $i = 1, 2, \dots, I$ – номер параметра в наборе;
- 2) параметры внешней среды, учтенные в ходе моделирования и представленные в виде вектора характеристик S , включающего в себя плотность воздуха и ускорение свободного падения;
- 3) физические параметры БВС также представлены в виде вектора характеристик Q , который включает в себя размеры аппарата, коэффициент силы тяги, коэффициент усиления вращательного момента винтов, моменты инерции относительно осей в декартовой системе координат XYZ ;

- 4) технические характеристики вычислительного устройства полетного контроллера представлены в виде одного параметра частоты дискретизации F_c , которая соответствует частоте дискретизации всей данной модели в MATLAB Simulink;
- 5) также следует учитывать целевые S_{com} и текущие значения S_{real} регулируемой величины для объекта управления, которые ввиду адаптивного поведения LQR, влияют на его характеристики;
- 6) адаптивные параметры LQR можно представить в виде набора функций:

$$f_j [LQ_i, S, Q, Fc], \quad j = 1, 2, \dots, J;$$

- 7) выходное значение управляющего сигнала связано со статическими и динамическими параметрами LQR, поэтому данное значение представляется целесообразным описать в виде матрицы $\{u_{ij}\}_{I \times J}$, где в качестве строк принимаются статические параметры параметров из набора LQ, а в качестве столбцов функции из набора f .

В данном исследовании критерием качества регулирования является коэффициент корреляции сигналов, а именно сигнала S_{com} , отображающего поступающую команду в СУ с LQR и сигнала для текущего состояния регулируемой величины объекта управления S_{real} . Данная метрика (R) как функция от исходных данных может быть выражена через следующее соотношение:

$$R(S_{com}, S_{real}) = \frac{1}{N-1} \cdot \sum_{n=1}^N \frac{S_{com,n} - \mu_{S_{com}}}{\sigma_{S_{com}}} \times \frac{S_{real,n} [LQ_i, f_j [LQ_i, S, Q, Fc, S_{real}, S_{com}], S, Q, Fc] - \mu_{S_{real}}}{\sigma_{S_{real}}}, \quad (1)$$

$$i = 1, \dots, I, \quad j = 1, \dots, J,$$

где $\mu_{S_{com}}$ и $\mu_{S_{real}}$ – средние отклонения для рассматриваемых сигналов S_{com} и S_{real} соответственно; $\sigma_{S_{com}}$ и $\sigma_{S_{real}}$ – стандартные отклонения для рассматриваемых сигналов S_{com} и S_{real} соответственно.

Вербально задачу следует выразить как поиск некоторого множества статических параметров LQ_i и определение зависимостей $f_j [LQ_i, S, Q, Fc, S_{real}, S_{com}]$, при которых осуществляется максимизация коэффициента корреляции сигнала R , при ограниченном диапазоне частот дискретизации Fc в соответствии с параметрами максимальных и минимальных частот отправки для рассматриваемой системы, в математической форме задачу можно представить в виде следующего выражения:

$$u_{ij}^* = \max_{0 \leq R \leq 1} R[LQ_i, f_j [LQ_i, S, Q, Fc, S_{real}, S_{com}], S, Q, F], \quad (2)$$

$$i = 1, \dots, I, \quad j = 1, \dots, J$$

при ограничении по частотам дискретизации $F_{c_{min}} \leq Fc \leq F_{c_{max}}$. При использовании критерия оптимальности задачу следует представить как поиск соотношения статических и динамических параметров LQR u_{ij}^* , обеспечивающего максимизацию коэффициента корреляции заданного сигнала S_{com} и сигнала, полученного с регулируемого параметра S_{real} посредством влияния управляющего воздействия с использованием алгоритма LQR. Данная задача реализуется в условиях виртуальной модели объекта управления, учитывающей ограниченный набор параметров.

LQR является не единственным решением для задачи стабилизации и ориентации мультироторного БВС, далее приводится анализ альтернативных решений, базирующихся на иных методах и моделях. Рассмотрим самый широко используемый алгоритм ПИД-регулятора, который представлен в работе [1], где он применяется для аналогичной задачи ориентации мультироторного БВС. Данный регулятор является наиболее универсальным и простым в синтезе, а благодаря гибкости настройки его параметров способен обеспечить заданные характеристики управления для любой несложной системы управления. Однако ПИД-регулятор также имеет ряд недостатков. Во-первых, его дифференциальная составляющая сильно зависима от высокочастотных шумов в системе, что может привести к дестабилизации регулируемой величины. Решается это различными методами, например один из подходов описан в работе [2]. Однако данный факт существенно усложняет процесс синтеза для рассматриваемого типа регуляторов. Во-вторых, ошибки интегральной части могут иметь определенный эффект накопления при долгом присутствии в системе достаточно большого отклонения управляемой величины, из-за чего в последующем происходит нарастание статической ошибки регулирования, что в свою очередь ведёт к увеличению эффекта перерегулирования и дестабилизации регулируемой величины и объекта управления. Это явление носит название интегрального насыщения и описано в работе [3]. В-третьих, регуляторы могут неэффективно работать с нелинейными системами или системами с большими задержками. Поэтому часто при синтезе данного типа регулятора используют метод нелинейного наблюдателя [4]. Также представляет интерес модальный регулятор, подразумевающий присутствие некоторого наблюдателя за процессом регуляции, который путём переключения режимов управления обеспечивает строго заданный переходный процесс для системы. Данный регулятор имеет следующие недостатки [5]: жесткая привязанность параметров регулятора к параметрам системы приводит к непредсказуемости работы системы управления при их изменении, неудовлетворительная работа системы управления при воздействии внешних возмущений и отсутствие возможности «наблюдения» всех координат системы одновременно. Данный регулятор находит своё применение в сложных системах управления, где другие алгоритмы менее эффективны [5]. Однако из этого следует и то, что для многих СУ модальный регулятор будет являться излишне сложным в контексте его синтеза и затраченных вычислительных ресурсов. Далее рассмотрим регуляторы на основе нечеткой логики [6]. Обозначим основные недостатки данного типа регулятора. Во-первых, необходимость привлечения экспертов для составления описания объекта управления в терминах нечёткой логики [7]. Во-вторых, трудоёмкость окончательной настройки регулятора из-за большого количества нечётких правил и терм [7]. В-третьих, сложность задания функций принадлежности нечётких терм-множеств лингвистических переменных, поскольку их выбор существенно влияет на процессы нечёткого регулирования [8]. В-четвертых, низкая применимость к сложным динамическим объектам. В частности это касается многосвязных объектов регулирования и объектов с запаздыванием [8]. А также нечёткое регулирование является эмпирическим подходом, вследствие чего в полной мере не решаются вопросы устойчивости, динамического качества и надежности синтезируемых систем регулирования [8].

LQR хорошо подходит для точно описываемой динамической системы и со строго определёнными параметрами определённого переходного процесса для управляемой величины. Однако данный регулятор не учитывает внутреннюю обратную связь объекта управления [9]. Заявленный недостаток устраняется в процессе синтеза корректирующего устройства в пространстве состояний, один из вариантов которого и представлен в данной работе. Также LQR находит своё применение в схожих задачах управления мультироторным БВС [10]. Исходя из проведенного анализа по указан-

ной тематике, можно сделать вывод, что все рассмотренные алгоритмы управления так или иначе подходят для задачи управления в СУ БВС. Однако наибольший интерес представляют различные сочетания этих алгоритмов [11–13], нивелирующие недостатки друг друга. В данном исследовании предложено решение, в котором сочетается ПИД-регулятор с адаптивным LQR. Адаптивная реализация LQR устраняет зависимость качества его регулирования от внешних воздействий на систему, а алгоритм ПИД-регулятора упрощает настройку и переносимость данного решения, чем достигается надежность.

1. Описание LQR регулятора

В данном исследовании применен LQR регулятор, который обеспечивает эффективное поведение переходного процесса для выбранного соотношения силы управляющего сигнала и затраченного времени на регулирование через матрицы коэффициентов Q и R . LQR базируется на основе динамической модели системы, а его синтез осуществляется исходя из модели вход-состояние-выход:

$$\dot{x} = Ax + Bu, \quad (3)$$

где $\dot{x}$ – вектор состояния, A и B – матрицы, описывающие управляющий регулируемый параметр и управляющее воздействие соответственно. Синтез LQR регулятора осуществляется за счет минимизации квадратичного функционала:

$$\int_{t^0}^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt. \quad (4)$$

Поиск минимума осуществляется путем решения уравнения Риккати:

$$A^T S + SA - SBR^{-1}B^T S + Q = 0, \quad (5)$$

где S – вспомогательная переменная для определения коэффициента усиления обратной связи K , являющаяся минимальной положительно определенной матрицей – решением данного уравнения. Далее с использованием уже известной матрицы S , следует найти матрицу коэффициентов усиления для управляющего сигнала K по следующей формуле:

$$K = R^{-1}B^T S. \quad (6)$$

2. Метод динамического синтеза коэффициентов регулятора

Предлагаемый метод содержит следующие этапы:

- 1) расчёт величины отклонения регулируемого параметра от желаемого значения;
- 2) расчёт коэффициентов усиления на основе алгоритма синтеза LQR в зависимости от полученной величины отклонения;
- 3) сохранение полученных коэффициентов как коэффициентов усиления для ПИД-регулятора в соответствии с их положением в матрице K ;
- 4) формирование ПИД-регулятором управляющего воздействия в соответствии с величиной отклонения с использованием рассчитанных коэффициентов усиления.

Рассматриваемую в данном исследовании СУ в контексте управления ориентацией БВС по углам крена и тангажа следует представить в виде дифференциального уравнения вида вход-выход [14–16]:

$$\frac{I_{RT}}{-2kl}\ddot{\alpha}_{RT} = u_{\Delta\omega}, \quad (7)$$

где $u_{\Delta\omega}$ – разность квадратов угловых скоростей вращения моторов, являющаяся управляющим воздействием; α_{RT} – угол Эйлера относительно осей x и y ; I_{RT} – момент инерции относительно осей x и y ; k – коэффициент тяги моторов. Рассматриваемое выражение в канонической наблюдаемой форме выглядит следующим образом:

$$\begin{bmatrix} \ddot{\alpha}_{RT} \\ \dot{\alpha}_{RT} \\ \alpha_{RT} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_{RT} \\ \dot{\alpha}_{RT} \\ \ddot{\alpha}_{RT} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{2kl}{I_{RT}} \end{bmatrix} u_{\Delta\omega}. \quad (8)$$

Данное соотношение является представлением ПИД-регулятора в форме вход-состояние-выход. В таком случае матрица коэффициентов будет соотноситься с составляющими ПИД-регулятора следующим образом:

$$u = K_{11} \times D + K_{11} \times P + K_{11} \times I. \quad (9)$$

Рассмотренный в данном исследовании метод базируется на задании соотношения матриц LQR Q и R динамически в соответствии с величиной корректируемого отклонения. Расчет коэффициентов усиления матрицы K предлагается осуществлять в процессе регулирования и принимать поступающее отклонение в качестве некоторой динамически меняющейся составляющей для матрицы R . Для этого матрицу R следует представить в виде единичной матрицы, выраженной следующим образом:

$$R = [C_R + \alpha_{err} \times Pr], \quad (10)$$

где C_R – константа для матрицы R ; α_{err} – отклонение по регулируемой величине, поступающее на вход регулятору; Pr – цена за единицу α_{err} для соотношения матриц Q и R , установленная эмпирически.

Матрица Q в предлагаемом методе синтеза LQR отражает динамику изменения коэффициентов отдельно для каждой составляющей ПИД-регулятора и представлена в следующем виде:

$$Q = \begin{bmatrix} f(\alpha_{err})_D + C_D & 0 & 0 \\ 0 & f(\alpha_{err})_P + C_P & 0 \\ 0 & 0 & f(\alpha_{err})_I + C_I \end{bmatrix}, \quad (11)$$

где $f(\alpha_{err})_D$, $f(\alpha_{err})_P$, $f(\alpha_{err})_I$ – функции от входного значения отклонения регулируемой величины для составляющих ПИД-регулятора соответственно; C_D , C_P , C_I – статические составляющие для Д, П и И составляющих ПИД-регулятора соответственно. Синтез LQR предлагается проводить согласно следующим этапам:

- 1) в качестве опорной точки на первом этапе следует провести синтез регулятора, учитывая только константные коэффициенты, определить которые требуется исходя из экспериментально полученных данных. Процесс подбора коэффициентов следует проводить аналогично методу подбора коэффициентов для ПИД-регулятора, за исключением учёта цены регулирования Pr , подбор которой необходимо осуществлять отдельно;
- 2) на втором этапе следует определить оптимальные зависимости для матрицы Q от регулируемой величины.

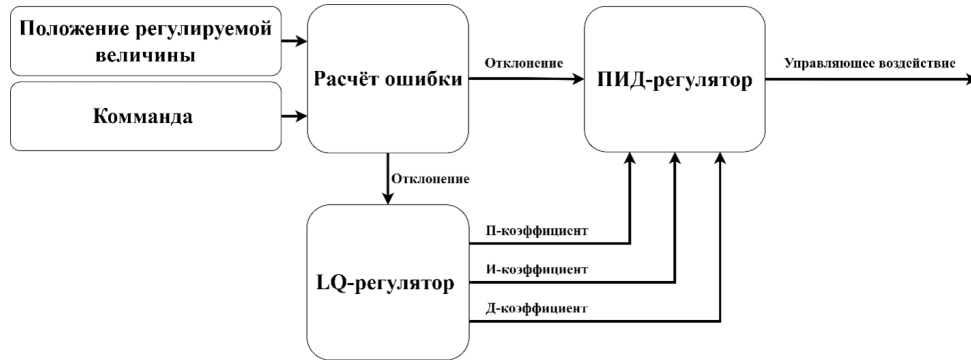


Рис. 1. Общая схема разработанной СУ

Итоговым результатом синтеза будет являться САУ, схема которой представлена на рис. 1.

Из рис. 1 видно, что предполагается параллельная работа LQR и ПИД-регулятора, где LQR можно охарактеризовать как наблюдателя за поведением регулируемой величины, который адаптирует параметры ПИД-регулятора под актуальное состояние объекта управления, обеспечивая тем самым большую надежность СУ. Также за счёт привязанности статических параметров LQR к динамической модели БВС упрощается переносимость данной системы на другие СУ мультироторных БВС путём частичного исключения эмпирических методов подбора коэффициентов усиления.

3. Сравнение LQR-алгоритма с ПИД-регулятором

В ходе исследования было проведено тестирование предлагаемого метода, для чего использовалась среда MATLAB Simulink, а также модель мультироторного БВС из библиотеки MATLAB Aerospace Blockset. Модель позволила сравнить рассматриваемый метод со встроенным в нее ПИД-регулятором, Simulink-модели для которых представлены на рис. 2, 3 соответственно.

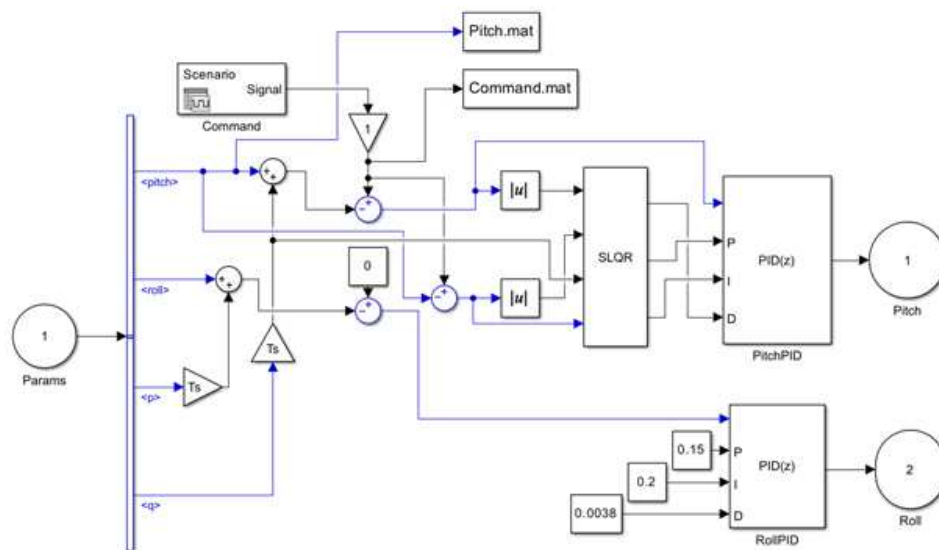


Рис. 2. Simulink-модель для LQR-регулятора

На рис. 3 можно видеть, что расчёт коэффициентов регулятора ведётся посредством интеграции в Simulink-модель S-функции регулятора, которая в процессе симу-

ляции высчитывает коэффициенты усиления для ПИД-регулятора. Также необходимо отметить, что СУ учитывает и параметр угла, и параметр угловой скорости (линии pitch и q соединяются через сумматор на рис. 3). Эмпирическим путём было выявлено, что в этой конфигурации величина перерегулирования меньше приблизительно на 30 %. Можно предположить, что учёт скорости позволяет рассматриваемому регулятору компенсировать возникающий момент вращения вследствие управляющего воздействия.

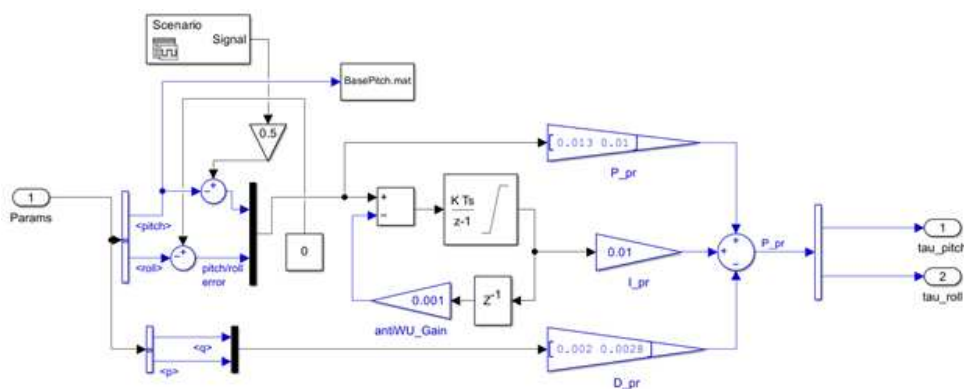


Рис. 3. Simulink-модель для ПИД-регулятора

На рис. 3 представлена стандартная модель ПИД-регулятора, изначально встроенная в модель. Здесь можно видеть, что ошибка регулирования принимается, исходя из отклонения по углу, и коэффициенты усиления статичны. Эта конфигурация СУ соответствует наиболее часто применяемой логике работы ПИД-регулятора в режиме управления по углу. Из рис. 2 и рис. 3 видно, что сбор команд и текущих данных ориентации БВС ведётся посредством записи их в файлы «Pitch.mat», «BasePitch.mat» и «Command.mat». Благодаря сохранению телеметрии удалось получить коэффициент корреляции рассматриваемых сигналов положения БВС к сигналам управления для обеих сравниваемых моделей. Коэффициенты корреляции рассчитывались отдельно для каждого сценария тестирования. Коэффициент корреляции удалось получить посредством MATLAB-функции «xcorr» с нулевым сдвигом и нормализацией к диапазон от -1 до 1 . Для сравнения LQR-алгоритма с ПИД-регулятором использовались следующие сценарии:

- 1) сценарий «стресс-тест», представляющий собой скачки управляющего сигнала с постоянно нарастающей амплитудой и шагом в 0,5 секунды. Данный сценарий, ввиду резко изменяющегося управляющего сигнала должен показать различие между базовым ПИД-регулятором и предлагаемым методом;
- 2) сценарий «контроль», который является плавно изменяющейся синусоидой с пиком в 0,5 радианы. Данный сценарий должен выявить поведение БВС в условиях приближенных, к реальному управляющему воздействию.

Результаты проведенного тестирования представлены на рис. 4, 5.

Как видно из рисунков, рассматриваемый в исследовании адаптивный LQR быстрее реагирует на управляющее воздействие. Значения коэффициентов корреляции для сценария «стресс-тест»:

- 1) для базового ПИД-регулятора: 0,7776;
- 2) для адаптивного LQR в сочетании с ПИД-регулятором: 0,9772.

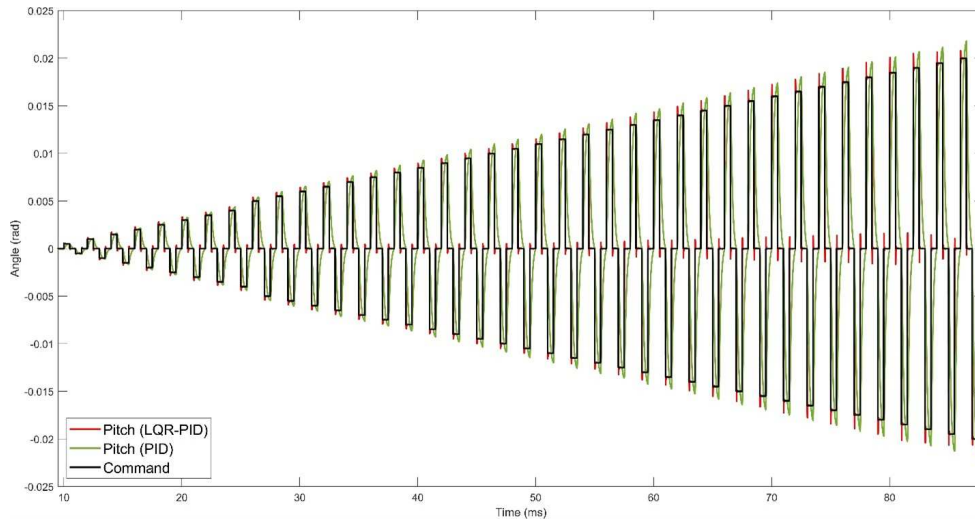


Рис. 4. Сценарий «стресс-тест»

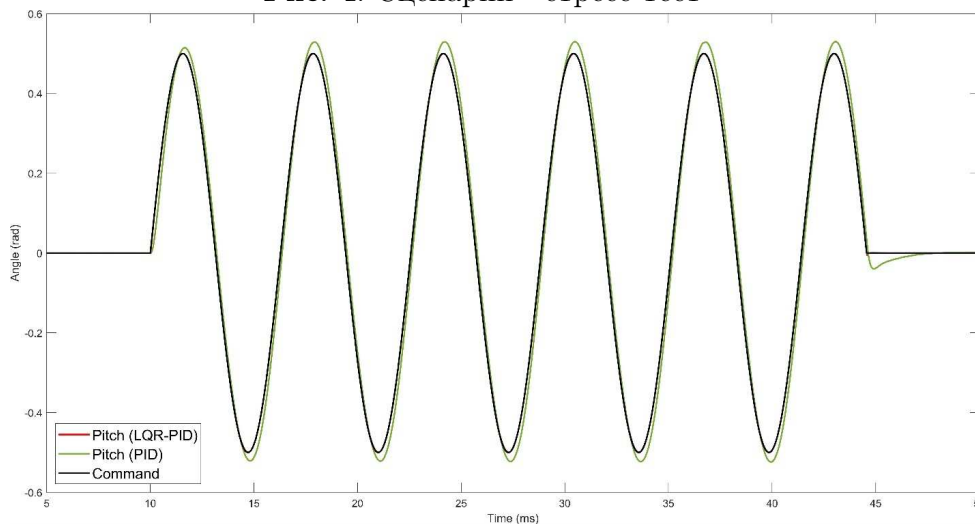


Рис. 5. Сценарий «контроль»

В ходе тестирования по сценарию «контроль» было выявлено, что в задаче стабилизации БВС предлагаемый метод справляется лучше ПИД-регулятора, также наблюдается сильное запаздывание ПИД-регулятора по сравнению с предлагаемым LQR-методом. Значения коэффициентов корреляции для сценария «контроль»:

- 1) для базового ПИД-регулятора: 0,9968;
- 2) для адаптивного LQR в сочетании с ПИД-регулятором: 0,9 (данное значение объясняется ограниченной точностью).

Заключение

В исследовании предложен новый метод динамического LQR-синтеза коэффициентов усиления и формирования управляющих воздействий, а также новый вариант синтеза регулятора, который функционирует в ходе работы СУ и динамически оптимизирует её параметры. Проведенное моделирование показало, что система автоматизированного управления, построенная на базе предложенного метода, может быть внедрена в систему управления БВС. В сценарии «стресс-тест» было достиг-

нуто уменьшение величины задержки регулирования приблизительно до 0,1 секунды увеличения, тогда как ПИД-регулятор с константными коэффициентами не успева-ет привести регулируемую величину в желаемое положение за 0,5 секунды. Также в сценарии «стресс-тест» было выявлено увеличение коэффициента корреляции при использовании предлагаемой СУ примерно на 26 % относительно ПИД-регулятора, который изначально присутствовал в модели. В дальнейших исследованиях плани-руется проведения ряда тестирований разработанных решений в условиях, прибли-женных к реальным посредством БВС мультироторного типа.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-69-00231, <https://rscf.ru/project/22-69-00231/>.

Литература

1. Praveen, V. Modeling and Simulation of Quadcopter Using PID Controller / V. Praveen, S. Pillai // International Journal Control Theory and Applications. – 2016. – V. 9, № 15. – P. 7151–7158.
2. Hayes, B. Design of PID Controllers Using Filippov's Method for Stable Operation of DC–DC Converters / B. Hayes, M. Condon, D. Giaouris // International Journal Circuit Theory Applications. – 2016. – V. 44, № 7. – P. 1437–1454.
3. Jinqiang Xu. An Expert PID Control Algorithm Based on Anti-Integration Saturation / Jinqiang Xu // Proceedings 2017 IEEE 2nd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference. – 2017. – P. 1536–1539.
4. Wen-Hua Chen. Nonlinear PID Predictive Controller / Wen-Hua Chen, D.J. Ballance, P.J. Gawthrop, J.J. Gribble, J. O'Reilly // IEE Proceedings Control Control Theory and Applications. – 1999. – V. 146, № 6. – P. 603–611.
5. Simon, J.D. A Theory of Modal Control / J.D. Simon, S.K. Mitter // Information and Control. – 1968. – V. 13, № 4. – P. 316–353.
6. Косицын, В.Г. Синтез систем управления с нечетким модальным регулятором / В.Г. Косицын, В.А. Соловьев // Информатика и системы управления. – 2002. – № 2. – С. 82–87.
7. Kickert, W.J. Analysis of a Fuzzy Logic Controller / W.J. Kickert, E.H. Mamdani // In Readings in Fuzzy Sets for Intelligent Systems. – 1993. – V. 1, № 1. – P. 290–297.
8. Чичерова, Е.В. Исследование свойств робастности нечетких логических регуляторов на примере контура управления расходом топлива газотурбинного двигателя / Е.В. Чичерова // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королева. – 2012. – № 3-1 (34). – С. 145–152.
9. Филимонов, А.Б. Некоторые проблемные аспекты нечеткого ПИД регулирования / А.Б. Филимонов, Н.Б. Филимонов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2018. – Т. 19, № 12. – С. 762–769.
10. Кибардин, В.В. Критерии оптимального управления и LQR-оптимизация в электропри-воде / В.В. Кибардин, О.А. Ковалева, В.Н. Язев // Вестник Красноярского государ-ственного аграрного университета. – 2015. – № 12. – С. 61–73.
11. Argentim, L.M. PID, LQR and LQR-PID on a Quadcopter Platform / L.M. Argentim, W.C. Rezende, P.E. Santos, R.A. Aguiar // Proceedings 2013 International Conference of Informatics, Electronics and Vision. – Dhaka, 2013. – P. 1–6.
12. Shilin, A. Synthesis of a Fuzzy Controller by a Second-Order Object with Delay / A. Shilin, H. Pham Trong, V. Nguyen Vuong // Informatics and Automation. – 2024. – № 5 (23). – P. 1505–1531.
13. Shmalko, E. Optimal Control Problems in Collaborative Multi-agent Robotic Systems / E. Shmalko, V. Serebrenny // Interactive Collaborative Robotics. – 2024. – V. 14898. – P. 281–292.

14. Tuyen, T. Adaptive Fast Terminal Sliding Mode (FTSM) Control and High Gain Observer (HGO) for Multi-Motor Web Transport Systems / T. Tuyen, T. Tinh, K. Krestovnikov // Interactive Collaborative Robotics. – 2024. – V. 14898. – P. 131–143.
15. Колотов, М.Е. Декомпозиция линейной модели квадрокоптера / М.Е. Колотов, Т.А. Смирнова // Молодой ученый. – 2016. – № 13. – С. 29–33.
16. Luukkonen, T. Modelling and Control of Quadcopter / T. Luukkonen // Independent Research Project in Applied Mathematics. – 2011. – V. 22, № 22. – 26 p.
17. Dharmawan, A. Model of Linear Quadratic Regulator (LQR) Control Method in Hovering State of Quadrotor / A. Dharmawan, T.K. Priyambodo // Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering. – 2017. – V. 9, № 3. – P. 135–143.

Данила Михайлович Волков, младший научный сотрудник, лаборатория автономных робототехнических систем, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук (г. Санкт-Петербург, Российская Федерация), volkov.d@iiias.spb.su.

Антон Игоревич Савельев, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, лаборатория автономных робототехнических систем, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук (г. Санкт-Петербург, Российская Федерация), saveliev@iiias.spb.su.

Поступила в редакцию 4 февраля 2025 г.

MSC 92C55

DOI: 10.14529/mmp250301

METHOD OF DYNAMIC SYNTHESIS OF ADAPTIVE LQR CONTROLLER COEFFICIENTS IN COMBINATION WITH PID CONTROLLER IN THE CONTROL SYSTEM OF A MULTIROTOR UAV

D.M. Volkov¹, A.I. Saveliev¹

¹St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences,
St. Petersburg, Russian Federation
E-mail: volkov.d@iiias.spb.su, saveliev@iiias.spb.su

The objective of this work is to improve the robustness and stability of the control system of a multirotor unmanned aerial vehicle (CS UAV) using a new method of dynamic LQR synthesis of gain factors and generation of control actions. The developed method ensures real-time adaptation of the UAV CS to external influences due to dynamically changing weighting factors of the cost matrices Q and R, as well as generated coefficients of the UAV dynamic model. A comparison of the synthesized controller based on the developed method with a PID controller, which is widely used in modern UAVs, is carried out. It is revealed that the developed method works comparatively better, showing, under certain experimental conditions, the percentage of correlation of the output action to the desired angular position is 26 % greater than the PID controller with static coefficients. At the same time, the time interval of the transient regulation process using the proposed method is on average 5 times smaller than that of the considered analogue.

Keywords: LQR; LQ-regulator; adaptive LQR; adaptive regulator; adaptive LQ-regulator; CS UAV.

References

1. Praveen V., Pillai S. Modeling and Simulation of Quadcopter using PID Controller. *International Journal Control Theory and Applications*, 2016, vol. 9, no. 15, pp. 7151–7158.
2. Hayes B., Condon M., Giaouris D. Design of PID Controllers using Filippov's Method for Stable Operation of DC-DC Converters. *International Journal Circuit Theory Applications*, 2016, vol. 44, no. 7, pp. 1437–1454. DOI: 10.1002/cta.2169
3. Xu Jinqiang. An Expert PID Control Algorithm Based on Anti-Integration Saturation. *Proceedings 2017 IEEE 2nd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference*, 2017, pp. 1536–1539. DOI: 10.1109/IAEAC.2017.8054270
4. Chen Wen-Hua, Ballance D.J., Gawthrop P.J., Gribble J.J., O'Reilly J. Nonlinear PID Predictive Controller. *IEE Proceedings Control Control Theory and Applications*, 1999, vol. 146, no. 6, pp. 603–611. DOI: 10.1049/ip-cta:19990744
5. Simon J.D., Mitter S.K. A Theory of Modal Control. *Information and Control*, 1968, vol. 13, no. 4, pp. 316–353. DOI: 10.1016/S0019-9958(68)90834-6
6. Kositsyn V.G., Soloviev V.A. Synthesis of Control Systems with a Fuzzy Modal Controller. *Computer Science and Control Systems*, 2002, no. 2, pp. 82–87.
7. Kickert W.J., Mamdani E.H. Analysis of a Fuzzy Logic Controller. *In Readings in Fuzzy Sets for Intelligent Systems*, 1993, vol. 1, no. 1, pp. 290–297.
8. Chicherova E.V. Study of Robustness Properties of Fuzzy Logic Controllers Using the Example of a Gas Turbine Engine Fuel Consumption Control Loop. *Bulletin of the Samara State Aerospace University Named after Academician S.P. Korolev*, 2012, no. 3-1 (34), pp. 145–152.
9. Filimonov A.B., Filimonov N.B. Some Problematic Aspects of Fuzzy PID Control. *Mechatronics, Automation, Control*, 2018, vol. 19, no. 12, pp. 762–769. DOI: 10.17587/mau/19.762-769
10. Kibardin V.V., Kovaleva O.A., Yazev V.N. Optimal Control Criteria and LQR Optimization in an Electric Drive. *Bulletin of the Krasnoyarsk State Agrarian University*, 2015, no. 12, pp. 61–73.
11. Argentim L.M., Rezende W.C., Santos P.E., Aguiar R.A. PID, LQR and LQR-PID on a Quadcopter Platform. *Proceedings 2013 – International Conference Informatics, Electronics and Vision*, Dhaka, 2013, pp. 1–6. DOI: 10.1109/ICIEV.2013.6572698
12. Shilin A., Pham Trong H., Nguyen Vuong V. Synthesis of a Fuzzy Controller by a Second-Order Object with Delay. *Informatics and Automation*, 2024, no. 5 (23), pp. 1505–1531. DOI: 10.15622/ia.23.5.9
13. Shmalko E., Serebrenny V. Optimal Control Problems in Collaborative Multi-Agent Robotic Systems. *Interactive Collaborative Robotics*, 2024, vol. 14898, pp. 281–292. DOI: 10.15622/ia.23.5.9
14. Tuyen T., Tinh T., Krestovnikov K. Adaptive Fast Terminal Sliding Mode (FTSM) Control and High Gain Observer (HGO) for Multi-Motor Web Transport Systems. *Interactive Collaborative Robotics*, 2024, vol. 14898, pp. 131–143. DOI: 10.1007/978-3-031-71360-6_1
15. Kolotov M.E., Smirnova T.A. Decomposition of the Linear Model of a Quadcopter. *Young Scientist*, 2016, no. 13, pp. 29–33.
16. Luukkonen, T. Modelling and Control of Quadcopter. *Independent Research Project in Applied Mathematics, Espoo*, 2011, vol. 22, no. 22, 26 p.
17. Dharmawan A., Priyambodo T.K. Model of Linear Quadratic Regulator (LQR) Control Method in Hovering State of Quadrotor. *Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering*, 2017, vol. 9, no. 3, pp. 135–143.

Received February 4, 2025