

УДК 629.7

# КОМПЕНСАЦИЯ ЗАПАЗДЫВАНИЯ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА НА ЭТАПЕ ЗАХОДА НА ПОСАДКУ И НА ПОСАДКЕ

**М.С. Тяглик**

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)*  
Россия, 125993, Москва, Волоколамское шоссе, 4  
E-mail: pvl@mai.ru

**Т.В. Воронка**

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)*  
Россия, 125993, Москва, Волоколамское шоссе, 4  
E-mail: pvl@mai.ru

**Ключевые слова:** компенсация запаздывания в тракте управления, беспилотный летательный аппарат, заход на посадку, посадка.

**Аннотация:** В работе рассматривается режим телеоператорного управления, характеризующийся наличием запаздывания в контуре управления. В этой связи проведены исследования влияния величины запаздывания в контуре управления на качество выполнения задачи посадки и определены максимально допустимые величины запаздывания, при которых возможно выполнить задачу посадки с использованием существующих средств отображения полетной информации. Обоснована необходимость создания альтернативного способа представления полетной информации, с алгоритмом компенсации запаздывания. Эффективность такого альтернативного способа представления информации оценивалась при проведении исследований на пилотажном стенде МАИ.

## 1. Введение

Для дистанционно пилотируемого летательного аппарата наиболее сложным является решение задачи посадки, так как при этом требуется высокая точность отслеживания программной траектории.

Само по себе точное управление линейными координатами является весьма трудной задачей из-за динамических особенностей объекта управления. Если рассмотреть передаточные функции, описывающие движение самолета по высоте, то она имеет астатизм второго порядка, а по боковой дальности – третьего порядка. Известно, что управление объектом с высоким порядком астатизма требует от летчика образования дополнительных контуров (по углу тангажа, углу крена, вертикальной скорости и углу курса). Это приводит к распределению внимания, а следовательно, снижению точности пилотирования, что сказывается на безопасности.

Дополнительным фактором, усложняющим процесс пилотирования в телеоператорном режиме, является наличие запаздывания, связанного с передачей управляющего сигнала с наземной станции управления на борт беспилотного летательного аппарата и обратно. Для устранения этих недостатков требуется создание альтернативных средств автоматизации, которые обеспечили бы хорошую с точки

зрения режима ручного управления динамику с компенсацией запаздывания в тракте управления и одновременно обеспечивающую наилучшее качество выполнения целевой задачи пилотирования.

В настоящей работе проведен комплекс исследований по обоснованию необходимости создания альтернативного варианта информационно-управляющего поля с наземной станции управления.

## **2. Оценка влияния времени запаздывания передачи управляющего сигнала с наземной станции управления**

Общей тенденцией, которой придерживаются в последние годы является автоматизация этапов полета гражданских самолетов. Однако, ввиду ряда причин, таких как требования к высокой точности пилотирования и наличие ветровых возмущений, а также несовершенство измерительных средств, этап посадки является недостаточно автоматизированным и выполняется в режиме ручного управления.

Процесс передачи сигналов с борта БПЛА на пост оператора и обратно сопровождается запаздыванием в контуре обмена данными. Запаздывание в контуре управления приводит к существенному ухудшению динамики объекта управления и развитию неустойчивых процессов в замкнутой системе при выполнении точного пилотирования, как в задаче посадки [1, 2].

Для оценки влияния запаздывания в контуре управления на характеристики системы самолет-лётчик были проведены экспериментальные исследования на пилотажном стенде МАИ.

При выполнении посадки лётчик с помощью наземной станции управления осуществляет так называемое позиционное управление [3]. На приборном оборудовании ему демонстрируется отклонение самолета от глиссады. Как было показано выше, при управлении линейными координатами лётчик должен образовывать дополнительные контура, для чего он использует такие показания приборов, как указатель угла тангажа и вертикальной скорости при управлении по высоте, указатели крена, курса при управлении боковой дальностью.

При проведении экспериментальных исследований перед лётчиком ставилась задача отслеживания глиссады, выполнения схода с нее и посадки.

При этом время запаздывания варьировалось в диапазоне от 0.2 до 0.8 сек. Так, например, если время запаздывание соответствует 0.2 сек, то это означает, что управляющий сигнал на борт самолета придет через 0.1 сек, а изображение внешней визуальной обстановки и показания приборов на наземной станции управления обновятся через 0.2 сек после введения оператором управления.

Экспериментальные исследования были выполнены как в отсутствии ветровых возмущений, так и при их наличии.

Было показано, что при отсутствии ветровых возмущений увеличение запаздывания до 0.2 секунд приводит к уменьшению вероятности принятия лётчиком решения на выполнение посадки на 20%. В диапазоне величин запаздывания от 0.2 до 0,4 секунд вероятность принятия лётчиком решения на выполнение посадки сохраняется на уровне 80%. С дальнейшим ростом величины запаздывания на каждые 0.2 секунды приходится уменьшение вероятности на 20%.

В том случае, если в качестве порогового значения вероятности выполнения посадки взять вероятность, равную 80%, то в этом случае для полета в спокойной атмосфере допустимое время запаздывания соответствует 0.4 сек, а для полета в условиях действия атмосферной турбулентности запаздывание не должно превышать 0.2 сек.

Так как при дистанционном управлении для современных БПЛА время запаздывания составляет от 1 и более секунд, то полученный результат указывает на невозможность выполнения безопасной посадки в таких условиях. Поэтому для обеспечения безопасного выполнения посадки необходимо создать альтернативные средства автоматизации, обеспечивающие компенсацию запаздывания в контуре управления. К таким средствам относятся системы отображения информации с прогнозом траекторного движения самолета и включающие алгоритмы компенсации запаздывания в тракте управления.

### **3. Система отображения информации для компенсации запаздывания в тракте управления**

В значительной части исследований системы самолет-летчик, выполненные в прошлые годы [1, 2], внимание в основном уделялось влиянию динамики объекта управления на действия летчика и свойства системы. В тоже время необходимо понимать, что процесс управления летчик осуществляет путем отклонения рычагов и восприятие качества выполнения задачи через дисплей. На свойства поведения оператора и системы самолет-летчик оказывает влияние значительное число переменных задачи (дисплей, входной сигнал, рычаг управления, объект управления). Поэтому выбор параметров технической части этой системы, в частности, дисплея должен осуществляться с учетом особенностей восприятия летчиком визуальной информации, свойств его адаптации и учитывать особенности его поведения летчика.

Таким образом можно сформировать совокупность требований, предъявляемых к дисплею, как к элементу системы самолет-летчик, обеспечивающим наилучшую динамику объекта управления в замкнутой системе для каждой задачи пилотирования. Такими общими требованиями являются:

- Дисплей должен позволять оператору легко образовывать обратные связи,
- Сигналы, передаваемые дисплеем, должны лежать в диапазоне рабочих частот летчика, а их величины - превышать пороги восприятия,
- Директорные метки, передаваемые на экран дисплея, должны влиять на динамику объекта управления и позволять оператору упростить его действия.
- Динамика объекта управления, сформированная с помощью дисплея не должна требовать сколь-либо существенных компенсирующих действий оператора и обеспечивать наилучшие пилотажные свойства в каждой целевой задаче;
- Динамика объекта управления, сформированная с помощью дисплея должна быть сформирована таким образом, чтобы не проявлялись эффекты нелинейности и запаздывания в тракте управления в штатных и аварийных условиях ее функционирования и гарантировать устойчивость объекта управления при изменчивости условий его применения.

При проектировании наземной станции управления целесообразно пойти по пути добавления на изображение кабины обстановки показаний приборов, что позволит существенно сократить время переключения внимания с приборного оборудования на внешнюю визуальную обстановку. В этой связи предлагается существующий вектор полетной информации дополнить элементами информационно-управляющего поля, обладающими свойствами прогнозирования траекторного движения.

Так как основной задачей дополнительных элементов информационно-управляющего поля является компенсация запаздывания в тракте управления, то они должны позволять оператору вводить опережающие действия. Для этих целей необходимо отобразить оператору тенденцию изменения заданной траектории

движения беспилотного летательного аппарата вплоть до момента посадки и для точного отслеживания такой траектории отобразить точку на этой траектории с диапазоном допустимых отклонений и спроецировать вектор скорости на эту точку, что позволит прогнозировать траекторное движение летательного аппарата. Выбор дальности отображения точки на траектории должен осуществляться по критерию обеспечения максимальной точности отслеживания траектории и при обеспечении наименее сложных действий оператора.

Для компенсации запаздывания необходимо закон формирования вектора скорости дополнить алгоритмом компенсации запаздывания.

Алгоритм компенсации запаздывания заключается в том, что к закону формирования проекции вектора скорости добавляются дополнительные сигналы для продольного ( $\Delta_H$ ) и поперечного ( $\Delta_Z$ ) каналов, описываемые выражениями:

$$\Delta_H = K_\theta \frac{T_2 p + 1}{T_1 p + 1},$$

$$\Delta_Z = K_\gamma \frac{T_4 p + 1}{T_3 p + 1}.$$

Параметры  $T_1, T_2, T_3, T_4, K_\theta, K_\gamma$  выбираются из условия компенсации отрицательных слагаемых в коэффициентах в числителе передаточной функции объекта управления.

В результате такой модификации, как показали результаты экспериментальных исследований на пилотажном стенде, точность пилотирования при величине запаздывания 1,5 секунды увеличивается в 3 раза по сравнению со случаем, когда алгоритм компенсации запаздывания отсутствует, и вероятность выполнения посадки увеличивается с 5 до 100%.

## 4. Заключение

В работе предложены формат и алгоритмы построения элементов информационно-управляющего поля наземной станции управления, прогнозирующие траекторное движение беспилотного летательного аппарата и показывающие оператору изменение заданной траектории движения для своевременного введения им опережающих действий при управлении в условиях наличия запаздывания в контуре управления.

Показано, что такая полетная информация должна содержать отображение заданной траектории движения самолета вплоть до момента посадки и для точного отслеживания заданной траектории должна быть показана точка на этой траектории с диапазоном допустимых отклонений и спроецированный вектор скорости на эту точку, что позволит прогнозировать траекторное движение летательного аппарата.

При этом выбор дальности отображения сечения должен осуществляться по критерию обеспечения максимальной точности отслеживания заданной траектории и при обеспечении наименее сложных действий летчика. Для компенсации запаздывания, входящего объект управления предложен алгоритм, основанный на вычислении дополнительного сигнала в вычислителе наземной станции управления. Показано, что использование такого дополнительного сигнала компенсирует запаздывание для той координаты, которой управляет оператор, и обеспечивает высокую точность при выполнении задач захода на посадку и посадки.

В результате экспериментальных исследований, проведенных на пилотажном стенде МАИ, было показано, что при использовании алгоритма компенсации запаздывания, происходит увеличение точности пилотирования в 3 раза по сравнению со случаем, когда алгоритм компенсации запаздывания отсутствует, и вероятность выполнения посадки увеличивается с 5 до 100%.

## Список литературы

1. Ефремов А.В. и др. Летчик как динамическая система. М.: Машиностроение, 1992. 343 с.
2. Ефремов А.В. Система самолет-летчик. Закономерности и математические модели поведения лётчика. М.: Изд-во МАИ, 2017. 196 с.
3. Пономаренко В.А., Лапа В.В., Лемещенко Н.А. Человеческий фактор и безопасность посадки. Военное издательство, 1993.