

САВЁЛОВ П. И., ГУ ПЭНХАО, ЛОБАТЫЙ А. А.

## ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОПЕРАТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫМ ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТОМ И ЕГО ЦЕЛЕВОЙ НАГРУЗКОЙ

Белорусский национальный технический университет

Статья посвящена постановке задачи синтеза системы управления беспилотным летательным аппаратом (БЛА) с участием человека-оператора. Проводится анализ различных подходов к синтезу систем, моделей человека-оператора, как звена следящей системы, математических моделей и информационного обеспечения сложных человеко-машинных систем, компетенций, необходимых операторам БЛА. В системе рассматривается человек-оператор как динамическое звено, осуществляющее компенсационное слежение за информацией, которая представлена на мониторе оператора, управляющего БЛА или его целевой нагрузкой в соответствии с поставленной задачей. На основе проведенного анализа обоснована обобщенная схема системы управления БЛА и его целевой нагрузкой, исследована математическая модель человека-оператора в виде передаточной функции, состоящей из пяти элементарных звеньев, учитывающих динамические характеристики центральной нервной системы, запаздывание нервно-мышечной системы, способности человека-оператора сглаживать случайные колебания, представляемой на экране монитора информации, получаемой от системы телеметрии. В качестве типового примера человеко-машинной системы управления рассматривается наземный пункт управления многофункционального беспилотного авиационного комплекса «Бусел», включающего два рабочих места для оператора управления БЛА и оператора управления целевой нагрузкой, в качестве которой рассматривается аппарата, предназначенная для мониторинга объектов, находящихся на земной поверхности.

**Ключевые слова:** беспилотный летательный аппарат; система управления; человек-оператор; математическая модель; целевая нагрузка.

### Введение

Всё большее распространение в различных сферах человеческой деятельности получают беспилотные летающие аппараты. Их сокращенно называют БЛА или БПЛА. Иногда встречается аббревиатура ДПЛА (дистанционно пилотируемые летательные аппараты). В тоже время всё чаще встречается такое, пришедшее с Запада, название этого типа летающих роботов, как дрон. Системы управления БЛА различаются широким разнообразием в зависимости от их предназначения, размещаемой на них аппаратуре, роли человека-оператора (ЧО) в процессе применения БЛА [1, 2].

Процесс управления БЛА может производиться без участия человека в управлении на основе заранее заложенной в бортовой компьютер БЛА программе (автономное управление). В настоящее время широкое применение имеют БЛА, в которых ЧО принимает непосредственное участие в процессе управления на всех этапах полёта БЛА, от взлёта до посадки. В связи с этим представляет интерес математическое моделирование ЧО как элемента системы управления БЛА.

### Роль человека-оператора в процессе управления БЛА

Основным предназначением БЛА является перемещение по воздуху определенной целевой нагрузки (ЦН). В качестве ЦН у большинства БЛА чаще всего применяются системы наблюдения за объектами, находящимися на земной поверхности. Эти системы могут работать в различных диапазонах электромагнитных волн: видимом, инфракрасном, радиотехническом. В связи с этим имеют место две взаимосвязанные задачи: управление непосредственно полётом БЛА и управление целевой нагрузкой (системой мониторинга). В обоих случаях как правило не обходится без ЧО несмотря на то, что на некоторых этапах применения БЛА и ЦН некоторые функции ЧО могут быть автоматизированы.

Типичным представителем БЛА многоцелевого назначения является беспилотный авиационный комплекс (БАК) «Бусел» [3]. На рис. 1 представлен внешний вид наземного пункта управления комплексом «Бусел».



Рис. 1. Внешний вид наземного пункта управления

Пункт управления включает два рабочих места: одно – для оператора управления полётом БЛА, второе – для оператора управления целевой нагрузкой (ЦН). Интерфейс (система отображения информации) оператора БЛА пред-

ставлен на рис. 2. На экране монитора оператору управления БЛА визуально представлены шкалы изменения высоты полёта БЛА, его скорости, углов крена и тангажа.

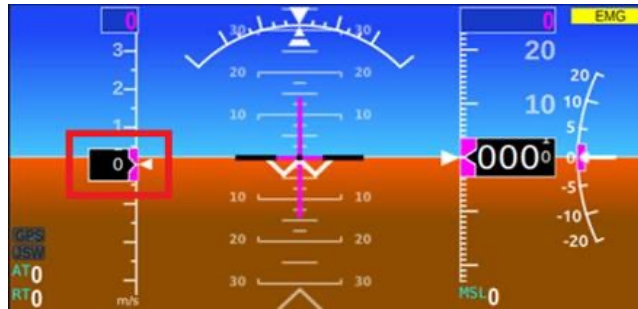


Рис. 2. Интерфейс оператора БЛА

На рис. 3 представлен интерфейс оператора ЦН с изображением земной поверхности и местоположением наблюдаемой цели. Здесь

также представлены показания лазерного дальномера (дальность от БЛА до цели) и другая необходимая информация.



Рис. 3. Интерфейс оператора целевой нагрузки

Структурная схема системы управления БЛА и его целевой нагрузкой для данной системы может быть представлена в следующем виде (рис. 4). На рис. 4 введены следующие обозначения: СОИ – система отображения информации; РК – радиоканал передачи информации (элементы системы телеметрии); УУ – устройство

управления (в данном случае – манипулятор и клавиатура оператора); РМ – рабочее место; СУ – система управления БЛА (автопилот), включающая измерители движения БЛА, систему стабилизации, приводы аэродинамических поверхностей, и прочие элементы, необходимые для управления полетом БЛА.

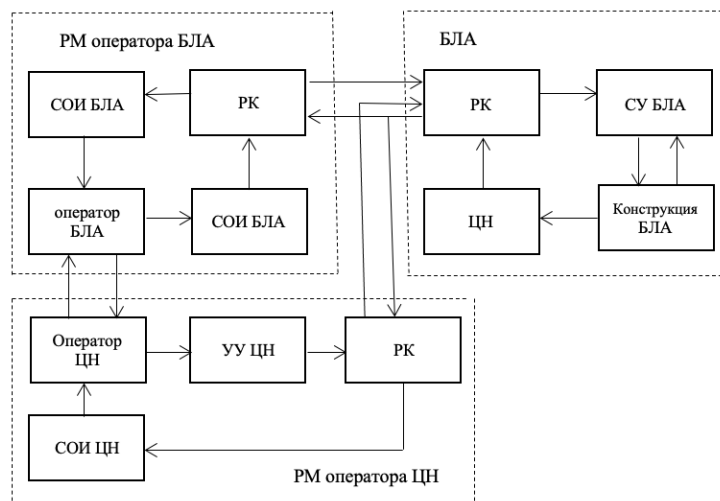


Рис. 4. Структурная схема системы управления БЛА и ЦН

Как видно из структурной схемы, представленной на рис. 4, в процессе управления полетом БЛА и управления целевой нагрузкой происходит взаимное нежелательное влияние различных каналов управления. Кроме того, что перемещение БЛА в пространстве влияет на ориентацию ЦН (видеосистемы), здесь взаимно влияют друг на друга действия двух различных операторов, которые в общем случае решают разные задачи, имеют разные физиологические особенности и квалификацию.

Так как синтез современных систем управления сложными техническими системами, к которым относятся БЛА, в значительной степени основан на их математическом моделировании, то для системы, включающей человека-оператора, и тем более – двоих операторов, необходимо иметь математические модели каждого конкретного человека-оператора.

#### Математическое моделирование человека-оператора

На основе структурной схемы строится математическая модель для исследования динамических и информационных характеристик БЛА.

Управление полетом БЛА может производиться оператором в ручном режиме на основе информации СОИ БЛА или в директорном режиме, при котором автоматически формируются и представляются на индикацию для оператора требуемые сигналы отклонения БЛА от заданной траектории.

Математические (информационные) модели элементов беспилотного авиационного

комплекса в основном известны. Представляют интерес математические модели операторов БЛА и ЦН, а также модели их взаимодействия с элементами БАК и между собой. Математические модели человека-оператора как звена следящей системы в информационном обеспечении и управлении сложной человеко-машинной системой рассматривается в ряде работ [4, 5].

Требования, предъявляемые к оператору БЛА, связанные с решением задач взаимодействия в системе «человек – летательный аппарат», близки к компетенциям военного пилота. Они подробно обоснованы и исследованы в работе [6]. Следовательно, математическая модель оператора БЛА в значительной степени идентична математической модели пилота летательного аппарата за исключением психологических факторов и воздействия физических факторов (перегрузки, вибрации, шума, посторонняя информация).

Систему управления с участием оператора можно отнести к так называемым компенсационным системам, в которых входной сигнал представляет собой отклонение некоторой координаты от её заданного значения. Простейшей моделью человека, осуществляющего компенсационное слежение, может служить линейное дифференциальное уравнение, связывающее ошибку управления и реакцию оператора. Результаты экспериментов и априорная информация о характере реакции человека-оператора позволили обосновать следующую обобщенную структуру передаточной функции оператора, осуществляющего компенсационное слежение [7].

$$W(p) = \frac{k_{\text{оп}} e^{-\tau p} (T_1 p + 1)}{(T_2 p + 1)(T_3 p + 1)} \quad (1)$$

В выражении (1) обозначено:  $k_{\text{оп}}$  – коэффициент усиления, зависящий от конструкции и технических характеристик устройства управления (манипулятора);  $\tau$  – время задержки реакции ( $\tau = 0.12 - 0.2$  с) определяется временем возбуждения нервных окончаний, временем прохождения сигнала по нерву, временем обработки его в центральной нервной системе, а также временем, необходимым для формирования соответствующей реакции.  $T_1$  – постоянная времени форсирующего звена, характеризующего опережение, которое может вносить оператор, реагируя не только на величину ошибки управления, но и на скорость её изменения. Постоянная времени  $T_2$  – характеризует способность

человека-оператора сглаживать колебания изображения на экране монитора.  $T_3$  – постоянная времени характеризующая запаздывание нервно-мышечной системы человека, и равна 0.1-0.2 с. Параметры передаточной функции (1) определяются экспериментально с учетом того, что система управления должна быть устойчивой и иметь соответствующий запас устойчивости по фазе и амплитуде.

На рис. 5 представлены качественные графики изменения переходных функций человека-оператора, динамические свойства которого описываются выражением (1). График 1 получен при  $\tau=0.12$ ,  $T_2=0.1$  (опытный оператор). График 2 получен при  $\tau=0.2$ ,  $T_2=0.3$  (неопытный оператор). Здесь принято, что  $T_1=0$ ,  $T_3=0.1$ .

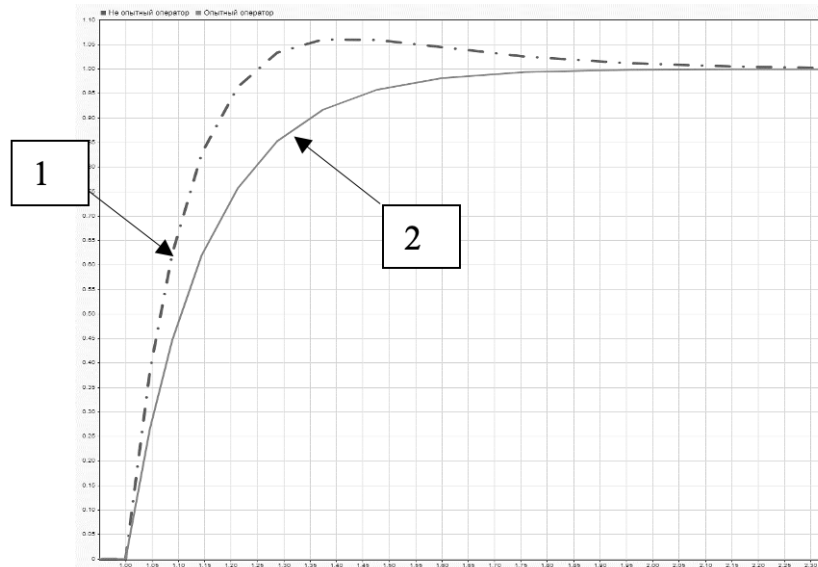


Рис. 5. Переходные функции человека-оператора

### Заключение

Не смотря на автоматизацию процессов управления элементами БАК, роль человека остаётся значительной на всех этапах применения БЛА, как при управлении полётом, так и при управлении целевой нагрузкой. Это обусловлено с одной стороны достижениями в области технического зрения, телеметрии, информационных технологий, что расширяет возможности БАК в целом. С другой стороны, эти достижения позволяют с помощью БЛА и ЦН решать ряд задач, для которых ранее эти системы не были предназначены. При этом учитывается, что БЛА являются дорогостоящими техническими системами, а дистанционное управление ими в отличие от управления пилотируемыми летательными аппаратами не требует особых условий для человека-оператора. Задача, решаемая при управлении БЛА, заключается в обеспечении его полёта по заданной траектории и выполнении маневров, которые могут потребоваться в процессе полёта. Задача управления ЦН состоит в получении и обработке информации об объектах, в том числе подвижных, находящихся на земной поверхности. Эта задача распадается на такие задачи как обнаружение объектов, распознавание среди окружающего фона, определение их характеристик (координат, скорости и т.д.).

Таким образом, БАК представляет собой сложную систему управления, состоящую как минимум из четырёх подсистем: БЛА, ЦН, опе-

ратор БЛА, оператор ЦН. Каждая из этих подсистем, которая имеет со свои динамические и статистические характеристики, оказывает влияние на работу других подсистем БАК. Разработка и исследование таких сложных систем требует создания соответствующих математических моделей, которые должны обеспечивать, особенно на этапе предварительного проектирования, определения основных свойств и возможностей системы БАК в целом.

В основе построения математических моделей систем управления БЛА лежит применение аппарата обыкновенных стохастических дифференциальных уравнений, которые позволяют решать задачи анализа и синтеза системы. При этом каждая из четырёх указанных выше подсистем БАК описывается своей системой дифференциальных уравнений, которые могут быть представлены в виде передаточных функций (в операторной форме) на основе применения преобразования Лапласа. Это даёт возможность использовать такой удобный для исследователя компьютерный программный пакет, как Matlab-Simulink. При этом могут использоваться известные математические модели типовых конструктивных элементов, из которых состоят БЛА и ЦН, а числовые значения характеристик математических моделей операторов БЛА и ЦН могут быть определены экспериментально для конкретного человека-оператора.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Беспилотные летательные аппараты / под общей редакцией Н.Н. Новичкова. – М.: Информационное агентство АРМС-ТАСС, 2009. – 436 с.
2. Беспилотные летательные аппараты. Основы устройства и функционирования / под ред. И.С. Голубева, И.К. Туркина. – М.: МАИ, 2010. – 654 с.



3. Семейство беспилотных авиационных комплексов видео-мониторинга местности «Бусел», «Бусел М», «Бусел М50»: <http://uavbusel.by/catalog.html/>.
4. Цибулевский, И. Е. Человек как звено следящей системы / И. Е. Цибулевский. – М.: Наука, 1981. – 288 с.
5. Брумштейн, Ю. М. Математические модели и методы решения задач информационного обеспечения, управления и оценки качества работы операторов в сложных человеко-машинных системах / Ю.М. Брумштейн, Д.А. Молимонов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: управление, вычислительная техника и информатика. 2019. № 3. – С. 73-87.
6. Ворона, А. А. Теория и практика психологического обеспечения летного труда / А.А. Ворона, Д.В. Гандер, В.А. Пономаренко. М.: Воениздат. – 2003. – 278 с.
7. Красовский, А. А. Системы автоматического управления летательных аппаратов / А. А. Красовский А.А., Ю. А. Вавилов, А. И. Сучков. – М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1986. – 477 с.

## REFERENCES

1. Unmanned aerial vehicles / under the general editorship of N.N. Novichkov. – М.: ARMS-TASS News Agency, 2009. – 436 p.
2. Unmanned aerial vehicles. Fundamentals of device and functioning / edited by I.S. Golubev, I.K. Turkin. – М.: MAI, 2010. – 654 p.
3. The family of unmanned aerial systems for video monitoring of the area «Buseb», «Busel M», «Busel M50»: [http://uavbusel.by/catalog.html /](http://uavbusel.by/catalog.html/).
4. Tsibulevsky, I. E. Man as a link in the tracking system / I.E. Tsibulevsky. – М.: Nauka, 1981. – 288 p.
5. Brumstein, Y. M. Mathematical models and methods for solving problems of information support, control and evaluation of the quality of operators' work in complex human-machine systems / Y.M. Brumstein, D.A. Molimonov // Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: management, computer technology and informatics. 2019. No. 3. - P. 73-87.
6. Vorona, A. A. Theory and practice of psychological support for flight work / A.A. Vorona, D.V. Gander, V.A. Ponomarenko. М.: Military publishing house. - 2003. - 278 p.
7. Krasovsky, A. A. Systems of automatic control of aircraft / A. A. Krasovsky A. A., Yu. A. Vavilov, A. I. Suchkov. – М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1986. - 477 p.

SAVELOV P.I., GU PENGHAO, LOBATY A.A.

### FEATURES OF SIMULATION OF OPERATOR CONTROL OF UNMANNED AERIAL VEHICLE AND ITS TARGET LOAD

Belarusian National Technical University

*The article is devoted to the formulation of the problem of synthesis of the control system of an unmanned aerial vehicle (UAV) with the participation of a human operator. An analysis is made of various approaches to the synthesis of systems, models of a human operator as a link in a tracking system, mathematical models and information support for complex human-machine systems, competencies required by UAV operators. The system considers a human operator as a dynamic link that performs compensatory monitoring of the relevant information that is presented on the monitor of the corresponding operator controlling the UAV or its target load in accordance with the task. On the basis of the analysis, a generalized scheme of the UAV control system and its target load is substantiated, a mathematical model of a human operator is studied in the form of a transfer function consisting of five elementary links that take into account the dynamic characteristics of the central nervous system, the delay of the neuromuscular system, the ability of the human operator to smooth random fluctuations of the information presented on the monitor screen received from the telemetry system. As a typical example of a human-machine control system, the ground control point of the multifunctional unmanned aerial complex "Busel" is considered, which includes two workplaces for the UAV control operator and the target load control operator, which is considered equipment designed to monitor objects located on the earth's surface.*

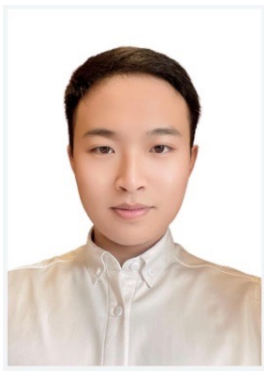
**Keywords:** *unmanned aerial vehicle; control system; human operator; mathematical model; target load.*



**Савелов Павел Игоревич**, аспирант кафедры «Информационные системы и технологии» Белорусского национального технического университета. Проводит исследования систем управления применительно к беспилотным летательным аппаратам.

**Savelov P.I.**, post-graduate student of the department of « Information Systems and Technologies» of the Belarusian National Technical University. Conducts research on control systems for unmanned aerial vehicles.

E-mail: [rts@bntu.by](mailto:rts@bntu.by)



**Гу Пэнхао**, аспирант кафедры «Робототехнические системы» Белорусского национального технического университета. Проводит исследования в области анализа и синтеза систем управления применительно к беспилотным летательным аппаратам.

**Gu Penghao**, post-graduate student of the Department of Robotic Systems, Belarusian National Technical University. Conducts research in the field of analysis and synthesis of stochastic control systems in relation to unmanned aerial vehicles.

E-mail: [fitr@bntu.by](mailto:fitr@bntu.by)



**Лобатый Александр Александрович**, доктор технических наук, профессор. Проводит исследования в области анализа и синтеза систем управления, в том числе - беспилотными летательными аппаратами. Автор и соавтор множества статей в научных журналах и конференциях, автор ряда книг и учебных пособий.

**Lobaty A.A.**, Doctor of Science, Professor. Conducts research in the areas of analysis and synthesis of control systems including unmanned aerial vehicles. He is the author and co-author of many articles in scientific journals, conferences and books.

E-mail: [lobaty@bntu.by](mailto:lobaty@bntu.by)