

УДК 623.61

**С.Г. БРАЙТКРАЙЦ**, доктор технических наук, старший научный сотрудник  
**С.И. БЕЗДЕНЕЖНЫХ**  
**В.М. ПОЛУШКИН**, кандидат технических наук

## АЛГОРИТМИЧЕСКИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К РЕАЛИЗАЦИИ ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ ОПЕРАТОРА НА ПУНКТАХ УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ

*В статье рассмотрены алгоритмические и методические вопросы реализации информационной поддержки оператора на пунктах управления беспилотными летательными аппаратами. Представленные предложения базируются на концепции оптимального электронного инструктора, разработанной академиком А.А. Красовским в качестве нового подхода к построению автоматизированных обучающих систем для авиационных тренажеров. Учитывая очевидную общность управляющей деятельности инструктора авиационного тренажера и оператора пункта управления летательными аппаратами, в статье рассмотрены возможности реализации алгоритмических и методических подходов концепции оптимального электронного инструктора как системы интеллектуальной и информационной поддержки операторов беспилотных летательных аппаратов. Предлагаемые решения могут быть использованы непосредственно в аппаратуре пунктов управления беспилотными летательными аппаратами, а также в качестве обучающих программ в специализированных центрах подготовки операторов беспилотных летательных аппаратов.*

**Ключевые слова:** оптимальный электронный инструктор; авиационный тренажер; беспилотные летательные аппараты; алгоритмические и методические подходы.

### Введение

В настоящее время беспилотные летательные аппараты находят широкое применение при решении обширного круга задач – от разведывательно-информационного обеспечения боевых действий, транспортировки грузов и боеприпасов, создания помеховой обстановки (затрудняющей действия противника) до задач поражения стационарных и подвижных объектов различных видов базирования.

Сейчас беспилотные летательные аппараты (БПЛА) рассматриваются уже как основополагающие базисные платформы, эффективность боевого применения которых определяется возможностями целевой нагрузки и бортовых комплексов, которые в свою очередь создаются на основе современных технологических решений.

В целом перспективные информационные технологии достаточно широко применяются в автономных боевых и обеспечивающих мобильных средствах, способных действовать самостоятельно и продолжать выполнение задания (или возвращаться на заданную позицию) в случае потери связи с центром управления. Эта сфера детально проработана в теоретическом и прикладном плане, благодаря наличию богатого опыта использования подобных систем гражданского назначения. Можно привести достаточно много примеров использования летательных аппаратов с использованием технологий информационной поддержки оператора.

В военной области известны опыты одиночного и группового применения в ВВС США F-16 в беспилотном режиме. Примером современного ударного БПЛА является разработанный американской компанией «Кратос Дефенсенд Секьюрити Солюшенс» (Kratos Defense & Security Solutions) БПЛА XQ-58 «Валькирия». Известно об относительно успешных испытаниях в 2019 и 2020 годах данного аппарата, позиционируемого как «напарник» управляемого человеком истребителя<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Стриж Е. Kratos XQ-58A Valkyrie: «беспилотник-напарник»? // Pravda.Ru. 2020. 17 апреля. – [https://militarypravda.ru/1482061-bespilotnik\\_naparnik](https://militarypravda.ru/1482061-bespilotnik_naparnik)

Исследовательская лаборатория ВВС США завершила вторую фазу испытаний по программе, в рамках которой осуществляется автономное управление истребителем. В рамках программы впервые создан и проходит испытания полноценный беспилотный истребитель пятого поколения. В 2017 году тестовый вариант, реализованный на более дешёвом истребителе F16, прошел испытание. В ходе испытания машина, оснащенная современными информационными технологиями, автономно реагировала на события, которые не были включены в программу полётов и представляли собой непредвиденные препятствия и сложности для выполнения заданий. Из 17 испытательных заданий в 16, не считая самого первого, платформа справилась со всеми сложностями. Уже сегодня очевидно, что информационные технологии позволяют создавать полностью функциональные боевые истребители и самолеты-штурмовики, не уступающие, а по ряду параметров превосходящие такие же самолёты, пилотируемые людьми.

Оператору (расчету) БПЛА приходится решать задачи управления взлетом, полетом по маршруту, управлением целевой нагрузкой, возвратом и посадкой, управлением групповыми действиями БПЛА. Кроме того, на пунктах управления операторы БПЛА проходят обучение и тренаж в режимах имитации применения летательного аппарата [1].

Для выполнения этих задач предназначены *наземные пункты управления* (НПУ), которые в общем случае содержат:

- рабочее место оператора управления БПЛА;
- рабочее место оператора полезной нагрузки;
- вычислительную управляющую систему;
- интерфейсные блоки;
- модули связи НПУ с БПЛА.

Рабочее место оператора управления БПЛА содержит средства задания полетных параметров для автоматического управления БПЛА, органы дистанционного управления БПЛА, пульт управления режимами целеуказания, коррекции информации и построения виртуальной глассады, пилотажные и навигационные индикаторы.

Совмещенное рабочее место оператора полезной нагрузки и управления тренировкой обучаемых может включать:

- пульт управления целевой нагрузкой;
- многофункциональные индикаторы отображения цифровой картографической, телевизионной и оптико-электронной информации;
- индикатор имитации внекабинной обстановки и предъявления обучающей информации;
- пульт формирования полетного задания.

Представленная совокупность задач, решаемых оператором (расчетом) НПУ БПЛА, состав оборудования, используемого для управления, говорят о чрезвычайно высокой информационной, сенсорной и моторной нагрузке.

Вопросы исследования сенсомоторной деятельности операторов БПЛА и операторской деятельности, вообще говоря, являются предметом инженерной, в том числе авиационной психологии и эргономики. В них, а также в области исследований по оптимизации функционирования человеко-машинных систем, накоплен серьезный научно-технический задел. Достаточно вспомнить работы П.К. Анохина [2; 3], Н.А. Бернштейна [4], Б.Ф. Ломова [5], Ю.П. Доброленского [6], В.А. Пономаренко [6; 7], Г.П. Шибанова [8] и других замечательных ученых. Одной из таких работ является разработанная в 1980-е гг. академиком А.А. Красовским концепция оптимального электронного инструктора (ОЭИ) [9]. Ниже рассмотрены аспекты применения этой концепции при моделировании деятельности операторов БПЛА с использованием в программном обеспечении НПУ БПЛА современных информационных технологий.

## **1. Использование концепции оптимального электронного инструктора при моделировании деятельности оператора БПЛА**

В соответствии с концепцией ОЭИ параллельно с обучаемым пилотом на тренажере это же упражнение выполняет автоматическая система управления на основе алгоритмов оптимального управления (в смысле заданных целевых функционалов), которая получила название оптимального инструктора. Результаты сопоставления действий пилота и ОЭИ предъявляются в определенном виде обучаемому.

В России и за рубежом были разработаны специальные обучающие формы – мнемокадры на основе командно-лидерной информации, где в роли лидера выступает ОЭИ [1; 9].

В дальнейшем концепция ОЭИ была развита в различных теоретических и прикладных применениях. На основе идеологии ОЭИ были разработаны обучающие программы для наиболее сложных этапов полета – взлета, посадки, дозаправки в воздухе, полетов в плотных боевых порядках и на предельно малых высотах, применения управляемых и неуправляемых средств поражения.

За рубежом аналогичные подходы разрабатываются в рамках программы «Pilot's assistance». Интересно отметить, что в настоящее время элементы этой программы находят применение при разработке бортовых систем управления перспективных летательных аппаратов военного и гражданского назначения<sup>2</sup>. При этом до последнего времени системы интеллектуальной поддержки разрабатываются и используются применительно только к пилотируемым летательным аппаратам (ЛА). Информация о применении или разработках систем, аналогичных ОЭИ и «Pilot's assistance», предназначенных для информационной поддержки операторов БПЛА, в открытой печати отсутствует.

Опыт боевых действий в локальных войнах и вооруженных конфликтах с интенсивным применением БПЛА показывает острую потребность систем интеллектуальной поддержки в аппаратуру операторов НПУ БПЛА. Боевая работа оператора длится непрерывно по 4 часа, по 12 часов в сутки. При продолжительности сеанса непосредственного управления более часа операторы ошибаются в оценках местоположения БПЛА, местоположения контролируемых объектов и взаимодействующих аппаратов, совершают когнитивные сенсомоторные ошибки.

Анализ деятельности операторов БПЛА обнаруживает глубокую общность с деятельностью пилота в области обработки информации, принятия решения за счет применения современных средств связи и обмена информацией, а также за счет управления полезной нагрузкой (оптико-электронной, телевизионной системой, ИК-аппаратурой наблюдения), создающей иллюзию присутствия оператора непосредственно на борту БПЛА. Психологическая и моторная нагрузка операторов безусловно менее напряженная, чем у пилота реального летательного аппарата, но вместе с тем достаточно высокая, особенно с учетом интенсивности применения БПЛА в современных боевых действиях.

Первым и необходимым шагом для построения систем информационной поддержки оператора БПЛА является разработка моделей операторской деятельности как одного из наиболее сложных видов человеческой деятельности.

## 2. Общая полужормализованная прогнозно-оптимизационная модель операторской деятельности

Проблема создания общей модели операторской деятельности до настоящего времени еще не решена. Однако, частные модели, особенно в режиме слежения, широко и достаточно эффективно используются при оптимизации операторской деятельности в различных системах человек-машина [8; 10].

К моделям одномерного слежения относится, например, универсальная модель Д. Макруера, Д. Грехема, Е. Крендела [11]:

$$W_{\text{опер}}(p) = \frac{k(T_1 p + 1)}{(T_2 p + 1)(T_3 p + 1)} \exp(-\tau_{\text{опер}} p), \quad (1)$$

где  $\tau_{\text{опер}}$  в зависимости от входного воздействия составляет 0,12 ... 0,2 с,  $T_2$  характеризует нейро-мышечный механизм. Величины  $T_1, T_3$  изменяются в процессе обучения оператора так, чтобы частота среза контура слежения попадала на участок с наклоном 20 дБ/дек.

Управляющая деятельность пилота и оператора БПЛА связана, как правило, с двумерным слежением. Это задачи директорного управления, задачи поиска и сопровождения

<sup>2</sup> Aviation Week & Space Technology. 2018. 7 May; Aviation Week & Space Technology. 2018. 4 June.

целей, задачи применения управляемого и неуправляемого оружия. Если динамические характеристики обоих каналов контура слежения приблизительно одинаковы, применение непрерывных моделей вида (1) оправдано и для двумерного слежения.

Для перехода к общим моделям операторской деятельности приведем описательную психофизиологическую модель П.К. Анохина. В 1935 году П.К. Анохин установил в человеческой деятельности наличие механизма обратной афферентации [2; 3]. Схема функциональной системы по П.К Анохину, заимствованная из [12], приведена на рисунке 1.

Главным в данной схеме и имеющим непосредственное отношение к операторской деятельности являются: предвидение (прогнозирование); мотивация и оптимизация; адаптация.

Представленная описательная модель операторской деятельности позволяет перейти к формализованным моделям. Поскольку определяющими в модели (рисунок 1) являются оптимизация и прогнозирование, будет обоснованным применение в качестве формализованной модели алгоритмов оптимального управления с прогнозированием. К таким алгоритмам, надежно зарекомендовавшим себя при решении целого ряда оптимизационных задач, относятся разработанные академиком А.А. Красовским алгоритмы с прогнозирующей моделью [13-15].

Алгоритмы оптимального управления с прогнозирующей моделью (АПМ) не могут считаться безусловно лучшими в обширном семействе алгоритмов оптимального управления. Мы останавливаемся на них, поскольку они достаточно глубоко проработаны в рамках концепции ОЭИ в авиационных приложениях. Вкратце, АПМ могут быть представлены следующей схемой.

Пусть поведение БПЛА, управляемого оператором, описывается уравнениями:

$$\dot{x} = F(x, y, t), \tag{2}$$

$$y = \dot{u}, \tag{3}$$

где  $x$  – вектор параметров БПЛА (координаты, скорость, параметры ориентации и т.д.);  
 $y$  – вектор зафиксированных отклонений органов управлений БПЛА;  
 $u$  – вектор управлений БПЛА.

Требуется минимизировать функционал обобщенной работы, составляющий алгоритмическую основу ОЭИ:

$$I = V_3(x(t_2), y(t_2), t_2) + \int_t^{t_2} Q_3(x(\theta), y(\theta), \theta) d\theta + 0,5 \int_t^{t_2} [u^T(\theta) k^{-1} U(\theta) + U_{оп}^T(\theta) k^{-1} U_{оп}] d\theta, \tag{4}$$

где  $V_3$  обычно определяют как терминальную часть функционала, заключающую требования к состоянию БПЛА в момент времени  $t_2$ ;

$Q_3$  – главная часть функционала, характеризующая качество движения и управления на интервале времени  $[t, t_2]$ ;

$\theta$  – внутреннее время под интегралом;

$U_{оп}$  – управление БПЛА, неизвестное до решения задачи;

$k$  – заданная симметричная матрица коэффициентов (подбираемая, как правило, экспертным путем).

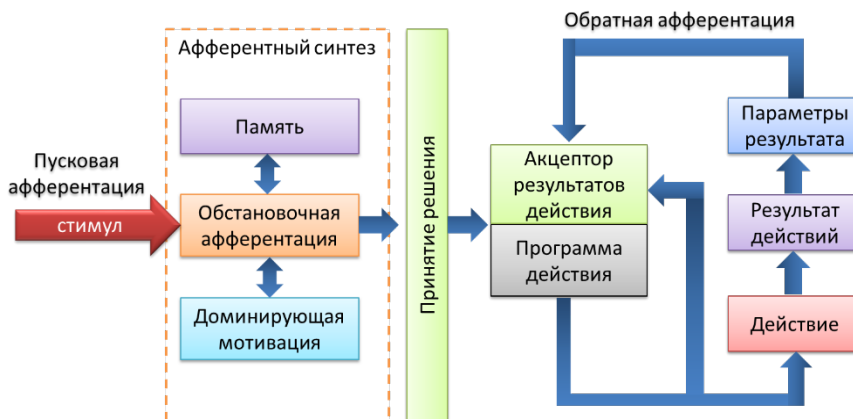


Рисунок 1 – Схема психофизиологической функциональной системы П.К. Анохина

В монографиях [14; 15] показано, что для поиска оптимального управления на интервале  $[t, t_2]$  достаточно определить только главную часть функционала (4) –  $I_\Gamma$  на свободном движении БПЛА, т.е. без третьего слагаемого в (4).

Оптимальным управлением, минимизирующим (4), будет вектор  $U$ :

$$U = U_{\text{оп}} = -k \frac{\partial^T}{\partial y} \left\{ V_3[X(x, y, t_2, t), y, t_2] + \int_t^{t_2} Q_3[X(x, y, \theta, t), y, \theta] d\theta \right\}. \quad (5)$$

Выражение (5) и определяют как алгоритм с прогнозирующей моделью, поскольку управление определяется на основе интегрирования параметров состояния объекта управления на прогнозируемом свободном движении объекта.

Для моделирования операторской деятельности можно использовать более общую модель, когда способ поиска минимума (4) не конкретизируется. Это могут быть градиентные методы, методы перебора, методы глобального поиска. Тогда вместо (5) можно записать:

$$\min_y \left\{ V_3[\hat{X}(\hat{x}, y, t_2, t), y, t_2] + \int_t^{t_2} Q_3[\hat{X}(\hat{x}, y, \theta, t), y, \theta] d\theta \right\}. \quad (6)$$

Здесь для учета стохастического характера движения БПЛА (2) используются оценки вектора состояния  $x - \hat{x}$ .

Открытым остается вопрос, как оператор (и в данном случае ОЭИ) воспринимает и оценивает состояние БПЛА –  $x$ . Многие исследователи считают, что и здесь деятельность оператора (оптимального оператора) будет направлена на поиск экстремума:

$$\min_{\hat{x}} [z - h(\hat{x})], \quad (7)$$

где  $z$  – вектор наблюдения (измерения) состояния объекта,  
 $h$  – векторная функция (для БПЛА это информационно-измерительная часть аппаратуры оператора),  
 $\hat{x}$  – оценка вектора  $x$ .

Для строгого решения (7) ряд авторов используют фильтр Калмана [11].

На рисунке 2 приведена модель оператора, заимствованная из [12] и используемая здесь в качестве модели оптимального электронного инструктора для оператора БПЛА. Данная модель является полужформализованной, поскольку алгоритмическое обеспечение для блока оценивания (1) и исполнительного блока (2) здесь не раскрывается.

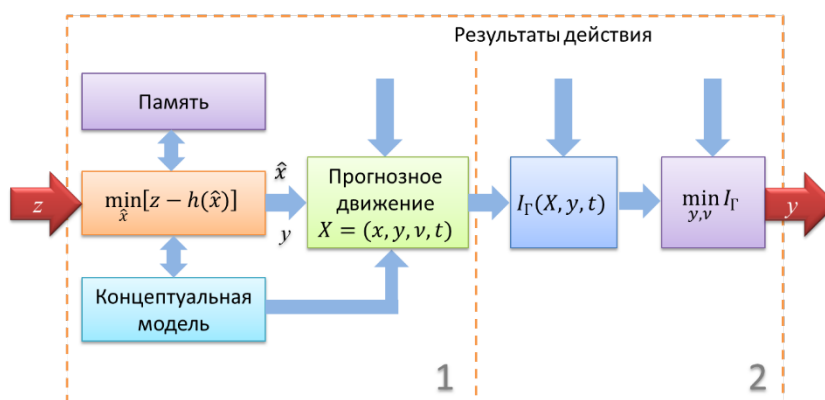


Рисунок 2 – Структура общей полужформализованной прогнозно-оптимизационной модели операторской деятельности

### 3. Проблемы эргономического обеспечения деятельности оператора БПЛА

В контексте обеспечения деятельности оператора БПЛА необходимо упомянуть еще один весьма важный аспект обеспечения деятельности – эргономический. К сожалению, огромный запас научных, технических и технологических решений, сформированный в 1950-1990-е гг. в области (авиационной) эргономики, оказался в значительной степени утерянным в силу катастрофических политических, экономических и социальных изменений, произошедших в РФ.

В значительной степени была утрачена школа авиационной эргономики, эргономические исследования в настоящее время практически не ведутся. При этом, как показывает статистика, авиационные происшествия по причине отказа техники происходят только в 10-15% случаев, по вине человека происходит 60-70% происшествий. С позиций эргономики понятие «человеческий фактор» – психофизиологические законы восприятия и переработки информации летчиком в полете, отражение его психикой цели полета, свойств объекта управления.

Однако зачастую при расследовании летных происшествий понятия «человеческий фактор» и «ошибка пилота» объединяют. Во многом причиной этому – практическое отсутствие эргономического сопровождения авиационной техники.

Формально порядок выполнения мероприятий эргономического обеспечения по созданию авиационной техники определен руководством по эргономическому обеспечению. Однако, при внимательном изучении этого документа обнаруживается его направленность на разработку и эксплуатацию пилотируемой техники.

Беспилотная техника, и тем более аппаратура оператора управления БПЛА, составляют с точки зрения эргономики существенно отличающуюся область. С одной стороны, это определяется необходимостью обработки объема информации большего, чем на борту летательного аппарата. С другой стороны – дефицит психофизиологической информации, определяемой в авиационной эргономике как «чувство самолета», «чувство полета».

К сожалению, наметившаяся в последние годы тенденция к занижению роли эргономических исследований в авиации в полной мере отразилась и на исследованиях операторской деятельности. Нарушен баланс между ростом объемов внедрения новейших технических разработок в сфере информационных технологий и их эргономического обеспечения.

### Заключение

С возрастанием роли беспилотной авиации все больше внимания будет уделяться оптимизации деятельности оператора НПУ БПЛА при управлении летательным аппаратом на всех этапах полета.

Разработку алгоритмических и методических решений для реализации в аппаратуре НПУ БПЛА предложено проводить в рамках концепции оптимального электронного инструктора (ОЭИ), разработанной академиком А.А. Красовским в качестве алгоритмического обеспечения автоматизированных обучающих систем для авиационных тренажеров. Учитывая очевидную общность управляющей деятельности инструктора авиационного тренажера и оператора пункта управления беспилотными летательными аппаратами, в статье рассмотрены возможности реализации алгоритмических и методических подходов концепции ОЭИ как основы системы интеллектуальной и информационной поддержки операторов БПЛА.

Разрабатываемая модель ОЭИ допускает использование различных методов оптимизации и может быть выполнена в программных имитационных модулях на современных ЭВМ.

Важное значение имеет эргономическое обеспечение пункта управления БПЛА. Наметившаяся в последние годы тенденция к занижению роли эргономических исследований в авиации в полной мере отразилась и на исследованиях операторской деятельности, поскольку наблюдается нарушение баланса между ростом объемов внедрения новейших технических разработок в сфере информационных технологий и их эргономического обеспечения.

### Список использованных источников

1. Эргатические интегрированные комплексы летательных аппаратов: монография / Под ред. М.М. Сильвестрова. М.: Фил. Воениздата, 2007. – 510 с.
2. Анохин П.К. Биология и нейрофизиология условного рефлекса. М.: Медицина, 1968. – 546 с.
3. Анохин П.К. Очерки по физиологии функциональных систем. М.: Медицина, 1975. – 448 с.
4. Бернштейн Н.А. О построении движения. М.: Медгиз, 1947. – 254 с.
5. Ломов Б.Ф. Методологические и теоретические проблемы психологии. М.: Наука, 1984. – 226 с.
6. Доброленский Ю.П., Завалова Н.Д., Пономаренко В.А., Туваев В.А. Методы инженерно-психологических исследований в авиации. М.: Машиностроение, 1975. – 280 с.
7. Береговой Г.Т., Завалова Н.Д., Ломов Б.Ф., Пономаренко В.А. Экстремально-психологические исследования в авиации и космонавтике. М.: Наука, 1978. – 303 с.
8. Шибанов Г.П. Количественная оценка деятельности человека в системах человек-техника. – М.: Машиностроение, 1983. – 264 с.
9. Красовский А.А. Концепция оптимального электронного инструктора и автоматизация обучения на тренажерах // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. 1989. №6. – С. 139-144.
10. Цибулевский И.Е. Человек как звено следящей системы. М.: Наука, 1981. – 288 с.
11. Шеридан Т.Б., Феррел У.Р. Система «человек-машина». Модели обработки информации, управления и принятия решений человеком-оператором. М.: Машиностроение, 1980. – 400 с.
12. Красовский А.А., Лопатин В.И., Наумов А.И., Самолаев Ю.Н. Авиационные тренажеры. М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1992. – 320 с.
13. Красовский А.А. Прогнозно-оптимизационная модель деятельности человека-оператора // Автоматика и телемеханика. 1991. №10. – С. 144-153.
14. Красовский А.А. Прогнозирование и оптимальное автоматическое управление // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. 1986. №4. – С. 115-122.
15. Красовский А.А. Математическая и прикладная теория: избранные труды. М.: Наука, 2002. – 364 с.