

# МЕТОДЫ ОПЕРАТИВНОЙ ОЦЕНКИ И ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИЦЕЛЬНО-НАВИГАЦИОННЫХ КОМПЛЕКСОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ СРЕДСТВ ОБЪЕКТИВНОГО КОНТРОЛЯ (часть 1)

Ю. Т. Зырянов

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия  
zut-tmb@mail.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Опыт учебно-боевой подготовки и боевого применения оптико-электронных прицельно-навигационных комплексов (ОЭПрНК) самолетов тактической авиации (ТА) в локальных войнах и конфликтах показывает, что их готовность и эффективность существенно зависят от точностных характеристик (ТХ), в частности, от точности юстировки входящих в их состав подсистем. В наибольшей мере это относится к визирным устройствам (ВУ) и датчикам. Цель работы – разработка методов оперативной оценки и обеспечения ТХ ОЭПрНК с использованием данных средств объективного контроля (СОК) на основе адаптивного управления профилактикой в межрегламентный период эксплуатации с учетом функциональных и конструктивных особенностей, внедрения концепции технического обслуживания (ТО) по состоянию с контролем параметров, адекватной эксплуатационным свойствам ОЭПрНК. *Материалы и методы.* Для достижения поставленной цели использованы методы математического моделирования, теории вероятностей и математической статистики, методы интегрального и дифференциального исчисления, методы анализа иерархий, методы группового учёта аргументов. *Результаты и выводы.* Разработанные новые методы контроля точности юстировки ВУ ОЭПрНК в полете, новизна которых подтверждена соответствующими патентами на способы их реализации, позволяют повысить готовность ОЭПрНК к применению, снизить трудозатраты на обеспечение ТХ в межрегламентный период эксплуатации в целом на порядок, а также повысить интегральную точность юстировки примерно в 3 раза.

**Ключевые слова:** точностные характеристики, организационно-техническая система, средства объективного контроля, техническое состояние, летные эксперименты, визирные устройства, «визуальная коррекция», погрешности юстировки лазерного и визирного каналов

**Для цитирования:** Зырянов Ю. Т. Методы оперативной оценки и обеспечения точностных характеристик оптико-электронных прицельно-навигационных комплексов с использованием данных средств объективного контроля (часть 1) // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 2. С. 62–71. doi:10.21685/2307-4205-2023-2-7

# METHODS OF OPERATIONAL EVALUATION AND ENSURING THE ACCURACY CHARACTERISTICS OF OPTO-ELECTRONIC SIGHTING AND NAVIGATION COMPLEXES USING THESE OBJECTIVE CONTROL TOOLS (Part 1)

Yu.T. Zyryanov

Tambov State Technical University, Tambov, Russia  
zut-tmb@mail.ru

**Abstract.** *Background.* The experience of combat training and combat use of optical-electronic sighting and navigation systems (OEPrNK) of tactical aircraft (TA) in local wars and conflicts shows that their readiness and effectiveness significantly depend on accuracy characteristics (TC), in particular, on accuracy adjustment of their constituent subsystems. To the greatest extent, this applies to sighting devices (VU) and sensors. Goal of the work – development of methods for operational assessment and provision of technical characteristics of the OEPrNK using these means of objective control (SOC) based on adaptive management of prevention in the interregional period of operation, taking into account the functional and design features, the introduction of the concept of maintenance (TO) according to the state with the control of parameters that is adequate to the operational properties of the OEPrNK. *Materials and methods.*

To achieve this goal, methods of mathematical modeling, probability theory and mathematical statistics, methods of integral and differential calculus, the method of analysis of hierarchies, the method of group accounting of arguments were used. *Results and conclusions.* The developed new methods for controlling the accuracy of the adjustment of the OEPPrNK VU in flight, the novelty of which is confirmed by the corresponding patents for the methods of their implementation, make it possible to increase the readiness of the OEPPrNK for use, reduce labor costs for providing technical characteristics in the interregional period of operation as a whole by an order of magnitude, and also increase the integral accuracy of adjustment by about 3 times.

**Keywords:** accuracy characteristics, organizational and technical system, means of objective control, technical condition, flight experiments, sighting devices, "visual correction", adjustment errors of the laser and sighting channels

**For citation:** Zyryanov Yu.T. Methods of operational evaluation and ensuring the accuracy characteristics of opto-electronic sighting and navigation complexes using these objective control tools (part 1). *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2023;(2):62–71. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2023-2-7

## Введение

Существующая система технической эксплуатации (ТЭ) предъявляет высокие требования к организации и проведению профилактических мероприятий, направленных на поддержание вооружения и военной техники (ВВТ) в постоянной готовности к эффективному боевому применению. Профилактические мероприятия охватывают широкий круг задач технического и организационно-технического характера. Это приводит к необходимости рассматривать человека в качестве одного из элементов сложных технических систем и, как следствие, к необходимости выделения особого подкласса искусственных систем – организационно-технических систем (ОТС), являющихся объединением организационных и технических систем. Наличие в ОТС технической составляющей и обслуживающего персонала в значительной степени определяет их неоднородность и усложняет моделирование систем такого класса. Изучение путей решения этой проблемы привело к выделению важного и отчасти самостоятельного направления теории эксплуатации – управления профилактикой в ОТС [1].

Опыт учебно-боевой подготовки и боевого применения оптико-электронных прицельно-навигационных комплексов (ОЭПрНК) самолетов тактической авиации (ТА) в локальных войнах и конфликтах показывает, что их готовность и эффективность существенно зависят от точностных характеристик (ТХ), в частности, от точности юстировки входящих в их состав подсистем. В наибольшей мере это относится к визирным устройствам (ВУ) и датчикам. Известные методы оценки ТХ, способы юстировки и компенсации погрешностей подсистем ОЭПрНК трудоемки и продолжительны по времени. Кроме того, многообразие и стохастический характер воздействия эксплуатационных факторов на подсистемы ОЭПрНК приводят к тому, что при одной и той же наработке или продолжительности эксплуатации они имеют различные ТХ. В связи с этим наработка или календарный срок службы не характеризуют однозначно ТХ ОЭПрНК, что определяет актуальность разработки методов оперативной оценки ТХ и компенсации выявленных погрешностей в межрегламентный период эксплуатации. Основными требованиями к организации профилактики ОЭПрНК являются плановость, адаптивность к различным условиям эксплуатации, учет состояния и возможность распределения ограниченных ресурсов ОТС. Однако существующая организация планирования и управления профилактикой в ОТС имеет ряд недостатков как организационного, так и технического характера [2, 3]. Это затрудняет обеспечение эффективного выполнения профилактических работ (ПР) в условиях функционирования ОТС при эксплуатации АТ по ресурсу и при методах эксплуатации, учитывающих уровень надежности ОЭПрНК. При этом необходимо отметить, что ни один метод эксплуатации не реализуется без проведения профилактики, и каждый из них имеет свою специфику при определении сроков и объемов ПР [4]. Это определяет актуальность задачи планирования и управления профилактикой в ОТС. Цель управления профилактикой в ОТС можно сформулировать следующим образом: обеспечение заданного уровня надежности и эффективности применения ОЭПрНК при минимальных затратах на эксплуатацию. Полученные до настоящего времени результаты дают возможность решать отдельные вопросы управления как организационными, так и техническими составляющими ОТС. Однако они не обеспечивают в требуемом объеме комплексного подхода к управлению профилактикой с учетом функциональных и конструктивных особенностей ОЭПрНК, состояния и возможностей распределения ограниченных ресурсов ОТС, внедрения концепции технического обслуживания (ТО) по состоянию с контролем параметров, адекватной их эксплуатационным свойствам. Поэтому важной

как в военно-научном, так и эксплуатационно-техническом аспекте является проблема повышения готовности и эффективности применения ОЭПрНК самолетов ТА при минимизации затрат на техническое обслуживание в межрегламентный период эксплуатации.

**Цель работы.** Разработка методов оперативной оценки и обеспечения ТХ ОЭПрНК с использованием данных СОК на основе адаптивного управления профилактикой в межрегламентный период эксплуатации с учетом функциональных и конструктивных особенностей, внедрения концепции технического обслуживания по состоянию с контролем параметров, адекватной эксплуатационным свойствам ОЭПрНК.

В результате проведенного анализа состояния проблемы исследования предложена концептуальная модель решения проблемы, в которой известная структура ОТС (рис. 1) имеет новый вид (рис. 2).

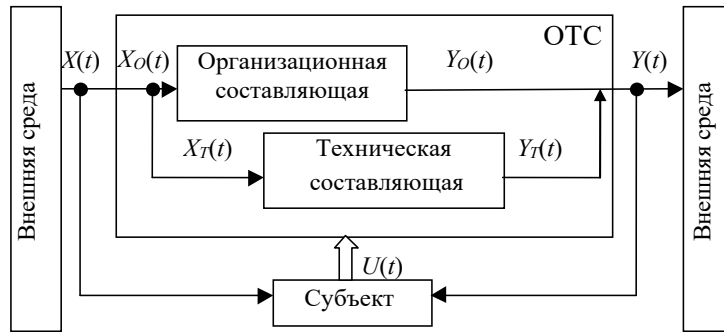


Рис. 1. Известная структура ОТС

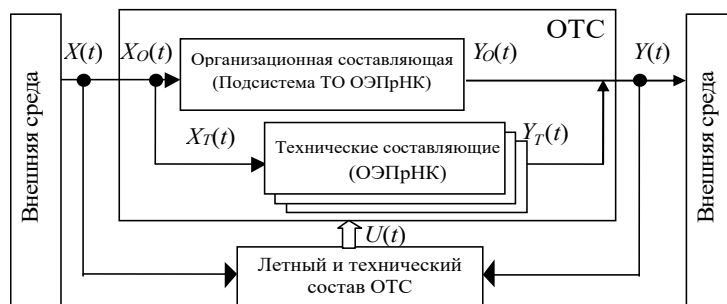


Рис. 2. Модифицированная структура ОТС

**Формализованная постановка задачи**

Рассматриваемая техническая составляющая как объект контроля представляет собой совокупность функциональных устройств различных по назначению, составу и принципам функционирования. Процесс контроля связан с подачей на объект стимулирующих сигналов, изменением реакций, обработкой информации по алгоритмам для получения значений контролируемых параметров. Параметры технической составляющей являются случайными величинами вследствие технологического разброса элементов и воздействия внешних факторов. Особенностью наблюдаемых при контроле сигналов является наличие в их составе помех, источником которых служит сам объект контроля, внешняя среда и др. Как правило, помехи представляют собой случайный процесс, нелинейно зависящий от измеряемых параметров. Таким образом, в общем случае имеется нелинейная динамическая система  $A(V, t)$ , состояние которой характеризуется  $p$ -мерным случайным вектором  $V$ . На вход системы  $A$  поступает случайный сигнал  $X$ . Наблюдается только выходной сигнал системы  $Y$ , который совместно с вектором  $X$  является зависимым случайным вектором:

$$Y(t) = A(V, t)X(t). \tag{1}$$

Входные и выходные сигналы – векторы, имеющие соответствующие размерности:

$$X(t) = (x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t))^T; Y(t) = (y_1(t), y_2(t), \dots, y_m(t))^T.$$

Входные сигналы  $X(t)$  включают в себя полезную составляющую  $g(t)$  и помеху  $\zeta(t)$ . Оператор  $A(V, t)$  зависит от времени  $t$  и вектора ТХ  $V = (v_1, v_2, \dots, v_p)^T$ , отражающего техническое состояние (ТС) контролируемой системы. Закон изменения случайного вектора  $V$ , характеризующего ТХ системы, в общем случае может быть описан выражением вида

$$V(t) = f_v(V, U_v, N, t) \quad (2)$$

с начальными условиями  $V(t_0)$ , шумами  $N$  и ограничением на управление  $U_v \in \vartheta$ . При этом существует однозначное отображение

$$\Phi_v : \{Y\} \times [t_0, t_k] \rightarrow \{\hat{V}\} \times [t], \quad (3)$$

где  $\{Y\}$  – множество значений вектора наблюдений;  $\{\hat{V}\}$  – множество значений вектора результатов оценок ТХ системы;  $\Phi_v$  – однозначное отображение элементов  $Y$  в элементы  $V$ ;  $[t_0, t_k]$  – интервал наблюдения.

Имея априорные сведения о векторе  $V(t)$  (2) и располагая наблюдениями  $Y(t)$ , требуется определить оценку  $\hat{V}(t)$  в виде  $\hat{V}(t) = f_v(Y, U_v, t)$  с заданными начальными условиями. Начальными условиями для решения задачи являются: известный вектор наблюдений  $Z(t)$  на интервале  $[t_0, t_k]$ ; принятые ограничения на управление  $U_v$ ; априорные сведения о виде оператора  $A$ .

При данной постановке задачи искомая оценка  $\hat{V}(t)$  будет представлять собой вектор-функцию изменения физических параметров функционирования системы, измеряемых непосредственно или косвенно, либо функцию некоего обобщенного критерия качества, являющегося абстрактной  $n$ -размерной проекцией  $m$ -размерного вектора ТС. Применительно к задаче оценки вектора ТХ ОЭПрНК по данным СОК, научная задача исследования заключается в разработке такого метода и алгоритма обработки вектора выходных сигналов, использование которых позволило бы оценить ТХ ОЭПрНК при его функционировании в реальных условиях применения по назначению.

### Результаты исследований

При разработке информационно-моделирующей системы (ИМС) экспресс-анализа данных СОК для оценки ТХ ОЭПрНК проведено обоснование проблемной области применительно к поставленной задаче. В состав проблемной области входят ТХ ОЭПрНК, условия выполнения рассматриваемых режимов функционирования и условия воздействия внешней среды.

Исходя из проведенной классификации боевых и навигационных режимов, рассмотрены два режима, в которых в качестве основных информативных устройств ОЭПрНК используются ВУ. Это режим «ВК» счисленных координат и один из режимов слежения за наземной неподвижной целью (мишенью) с фиксированным углом прицеливания.

Проведенный анализ алгоритмического обеспечения показал, что информация о параметрах полета в исследуемых режимах, фиксируемая СОК, является достаточной для построения уравнений связей между величинами, характеризующими погрешности функционирования ОЭПрНК, и может применяться как дополнительный информационный критерий в системе оперативного поддержания ТХ в межрегламентный период эксплуатации. Однако такая информация представляется только в момент привязки и слежения за целью (мишенью) или при выполнении режима «ВК» (нажатия кнопки), поэтому для восстановления зависимости погрешностей функционирования ОЭПрНК от времени необходимо дополнить данные СОК данными моделирования этих режимов.

Решается задача представления указанных данных в соответствии с некоторой моделью проблемной области. Построение модели проблемной области выполняется при помощи особого класса компьютерных систем – информационно-моделирующих. При этом конечное представление проблемной области состоит из двух взаимосвязанных отображений: инфологической модели проблемной области, удобной для восприятия и анализа человеком, и даталогической модели, которая относится к математическому обеспечению реализуемых режимов. Построение даталогической модели выполняется с применением объектно-ориентированного анализа процесса функционирования

ОЭПрНК. В работе [5] произведено обоснование структуры ИМС, отличительной особенностью которой является совместное использование информации СОК, данных эксплуатации и математических моделей функционирования ОЭПрНК в выбранной проблемной области. Новизна технического решения подтверждена патентами на изобретение [6, 7].

Проведен анализ и оценка влияния погрешностей юстировки ВУ на ТХ ОЭПрНК [8–10], включающие в себя методику анализа влияния погрешностей юстировки лазерного и визирного каналов (ЛиВК) на вероятность определения первичных параметров цели и алгоритм оценки влияния медленно меняющейся погрешности юстировки ВУ на ТХ. Результаты расчетов вероятности  $P$  определения первичных параметров цели по предложенной методике в зависимости от погрешности юстировки  $\Delta_B$ , угловых размеров цели  $\Delta\Theta_c$ , погрешностей наводки летчика  $\sigma_n$  и угла расходимости лазерного луча (ЛЛ)  $\Delta\Theta_{ЛЛЗ}$  представлены на рис. 3.

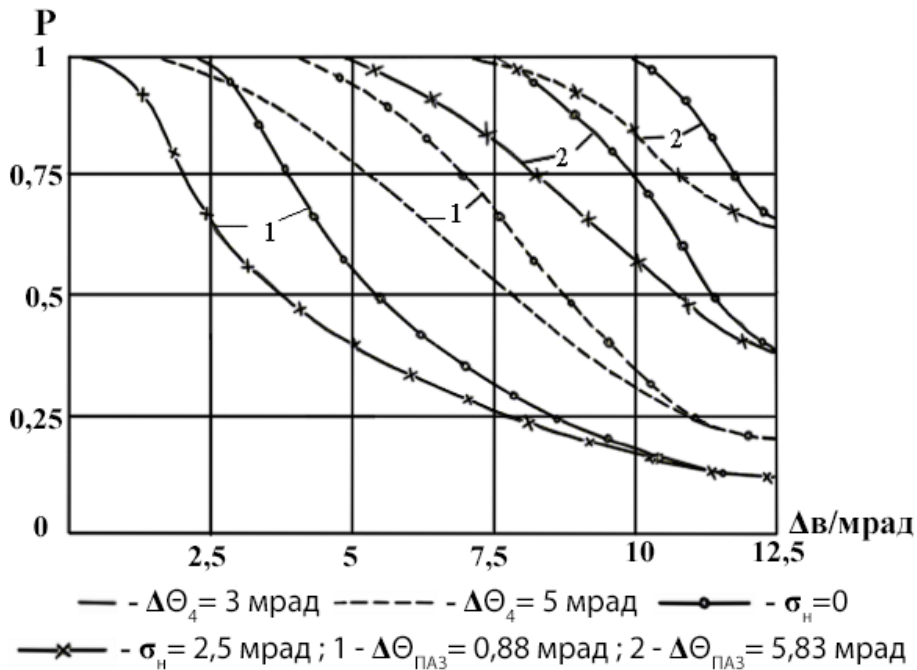


Рис. 3. Результаты расчетов вероятности  $P$

Анализ полученных данных позволяет сделать следующие выводы: при малых погрешностях юстировки (менее 5 мрад) и малом угле расходимости ЛЛ (порядка  $3' \approx 0,88$  мрад) вероятность существенно зависит от уровня подготовки летчика (так, при увеличении  $\sigma_n$  от 0 до 2,3 мрад – уровень подготовки 1-го класса, вероятность снижается на 15...20 %); при погрешностях юстировки порядка 5...8 мрад вероятность зависит от угла расходимости ЛЛ и углового размера (дальности) цели и принимает удовлетворительные значения для летчиков с уровнем подготовки 1-го и 2-го классов; при наличии систематических погрешностей юстировки Л и ВК более 10 мрад вероятность существенно зависит от угла расходимости ЛЛ и практически не зависит от точности наводки летчиком.

Кроме того, разработан алгоритм оценки влияния медленно меняющейся погрешности юстировки ВУ на ТХ ОЭПрНК [11]. Получена зависимость, характеризующая математическое ожидание функции невязки вектора наблюдений с ожидаемой реакцией системы, вызванной отличным от нуля вектором ТХ  $V(t)$  на детерминированную функцию  $b(t)$  (систематическую погрешность юстировки ВУ):

$$m_b(t) = \frac{\dot{m}_{\hat{Y}} - M[a(\hat{Y}, t)]}{K} \tag{4}$$

Особенностью (4) является наличие в выражении производной оценки вектора состояний, что говорит о влиянии на ошибку скорости его изменения. Таким образом, имея математическую модель (ММ) исследуемого ОЭПрНК в виде

$$\frac{d}{dt}Y(t) = A[Y(t), U_v(t), \xi(t), t], \quad Y(t_0) = Y_0, \quad (5)$$

известный вектор управлений  $U_v$  и наблюдения вектора состояния  $\hat{Y}$  функционирования ОЭПрНК (данные СОК), можем одним из известных математических методов восстановления ММ получить зависимость

$$b(t) = f[\hat{Y}(t), U_v(t), V, t], \quad (6)$$

представляющую собой в простейшем случае систему алгебраических уравнений. Решая уравнение (6) относительно постоянной величины  $V$ , получим вектор результатов оценки ТХ ОЭПрНК.

Известен метод юстировки прицельных систем при помощи специальной мишени. Сущность метода состоит в привязке связанной системы координат (ССК) ЛА к мишени, установленной впереди ЛА, определении визуально по отчетному визиру (ОВ) рассогласования между перекрестием на мишени, индицирующим требуемое положение «нуля» неподвижной оси ВУ – прицела коллиматорного типа и истинным положением неподвижной оси ВУ. Далее механическим способом устраняется (компенсируется) погрешность. К недостаткам можно отнести большое количество применяемых средств, а также высокие трудозатраты при проведении юстировки.

При разработке метода и алгоритма оперативной оценки точности юстировки ВУ относительно связанной системы координат (ССК) ЛА в **горизонтальной плоскости** учитывались следующие обстоятельства [12–16]. При решении задачи навигации с «ВК» геодезические координаты  $(B, L, h)$  ЛА определяются через матрицы перехода после расчета прямоугольных координат  $(x, y, z)$ . В свою очередь, указанные координаты вычисляются по значениям наклонной дальности  $D$ , угла места  $\mu$  и азимута  $A$  ориентира (мишени). Если в качестве визуального ориентира использовать один из промежуточных пунктов маршрута (ППМ), координаты которого заранее введены в бортовую цифровую вычислительную систему (БЦВС), то используя особенности алгоритмического обеспечения режима, выявляется возможность определения значения статической составляющей систематической погрешности работы прицельно-навигационного тракта, выраженной через точность юстировки ВУ относительно ССК ЛА в горизонтальной плоскости  $\Delta\phi_r$ .

Предположим, что значение азимута  $A(t_i)$  в момент времени  $t_i$  известно точно. Тогда коррекция координат в горизонтальном канале сводится к следующему: в момент времени  $t_i$  значение угла визирования ориентира в горизонтальной плоскости определится выражением

$$\phi_r = \psi + A + \Delta\phi_r, \quad (7)$$

и значение бокового отклонения от линии заданного пути (ЛЗП) скачкообразно изменится на величину  $\Delta z = z(t_i) - f(\phi_r)$ , где  $f(\phi_r)$  – известная функция. По значению погрешности в определении боковой координаты и точному значению  $A(t_i)$  можно определить величину погрешности юстировки  $\Delta\phi_r$  ВУ. Однако из-за ошибок в оценке  $(x, y, z)$  положения ЛА величина  $\Delta z$  будет известна с погрешностями, не связанными с точностью юстировки ВУ. Тогда, проведя **повторную коррекцию** координат для  $\Delta\phi \neq 0$ , можно получить ошибку в определении боковой координаты  $\Delta z$  без влияния погрешностей счисления пути. Таким образом, выполнение режима «ВК» для определения погрешности юстировки ВУ относительно ССК ЛА имеет следующие отличительные особенности: решение задачи «ВК» производится в режиме полета по запрограммированному маршруту; процесс коррекции счисленных координат производится относительно ориентира, хорошо различимого летчиком на подстилающей поверхности, координаты которого заранее введены в БЦВС; коррекция курса производится путевым методом. Для реализации предложенного подхода предлагается **повторно выполнить** режим «ВК» после стабилизации курса системой автоматического управления (САУ).

Рассмотрим алгоритм выполнения режима для определения точности юстировки ВУ относительно ССК ЛА на основе расчетов, производимых в БЦВС. На рис. 4 представлены этапы выполнения режима «ВК».

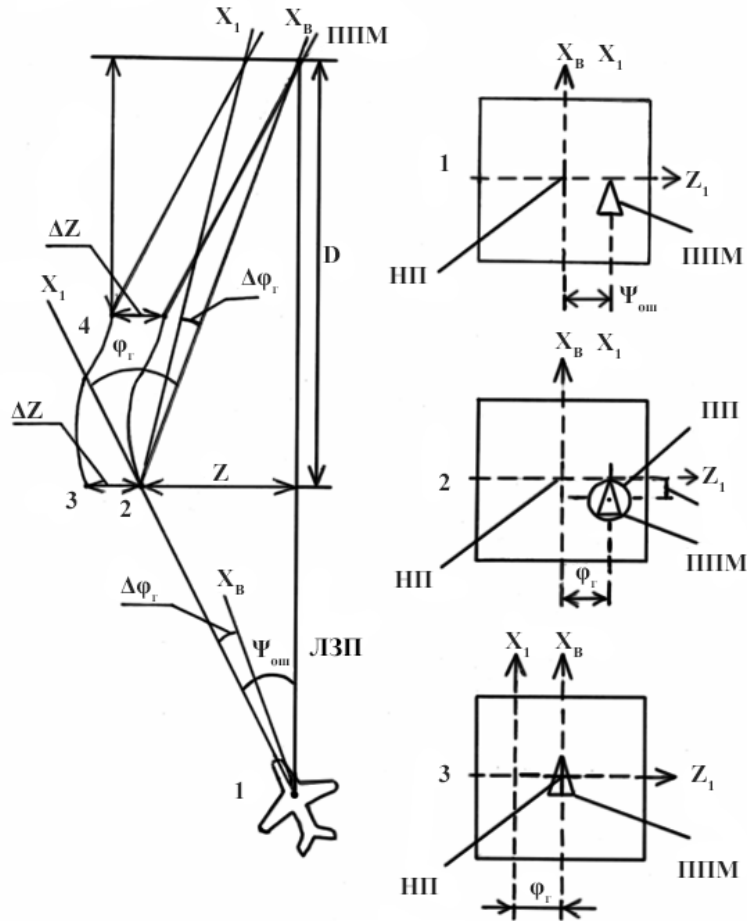


Рис. 4. Этапы выполнения режима «ВК»

При ошибочном выдерживании курса в процессе полета по маршруту ЛА отклоняется от ЛЗП со скоростью, пропорциональной ошибке  $\psi_{он}$ , и двигается от точки 1 к точке 2. Летчик, обнаружив визуальный ориентир (в данном случае ППМ), включает режим «ВК» и при помощи механизма управления (МУ) подвижным перекрестием (ПП) ВУ совмещает его с изображением ориентира. По завершении этой операции координаты ПП из индикаторной системы координат пересчитываются в связанную систему. Затем эти данные переводятся в стабилизированную систему координат для определения отклонения линии визирования ориентира в горизонтальной  $\phi_G$  и вертикальной  $\phi_B$  плоскостях относительно оси симметрии ЛА. С использованием значений углов  $\phi_G$  и  $\phi_B$  автоматически рассчитываются расстояние  $D$  ЛА до ориентира и боковое отклонение  $Z$  от ЛЗП в ортодромической системе координат:

$$D = H \text{ctg}(\phi_B - \vartheta), \tag{8}$$

$$Z = H \text{tg}\phi_G \text{ctg}(\phi_B - \vartheta), \tag{9}$$

где  $D$  – дальность до ориентира;  $Z$  – боковое отклонение ЛА от ЛЗП;  $H$  – высота полета ЛА, измеряемая радиовысотомером;  $\vartheta$  – угол тангажа ЛА. По заданным координатам ориентира и полученным значениям  $D$  и  $Z$  корректируются счисляемые на борту ЛА координаты его местоположения. Найденные значения  $D$  и  $Z$  используются в САУ для счисления заданного курса при путевом методе управления

$$\psi_{зад}^* = \psi_{ЛЗП} - \text{arctg} \frac{Z}{D}, \tag{10}$$

где  $\psi_{зад}^*$  – скорректированный заданный курс ЛА;  $\psi_{ЛЗП}$  – курс ЛЗП.

В зависимости от полученного значения  $\psi_{\text{зад}}^*$  САУ формирует закон управления, под влиянием которого ЛА выводится на новую ЛЗП, соответствующую уравнению (10). Осуществляется также стабилизация ЛА по тангажу и крену. При путевом методе управления САУ формирует сигналы управления, вызывающие поворот продольной оси  $X_1$  ЛА в направлении ориентира. При этом ось  $X_B$  неподвижного перекрестия (НП) ВУ, совмещенная с осью  $X_1$ , по завершении процессов управления должна быть направлена в сторону изображения ориентира. Однако при наличии погрешности юстировки ВУ относительно ССК ЛА в горизонтальной плоскости неподвижное перекрестие (НП) после коррекции курса не будет совпадать с изображением ориентира. Расчет бокового отклонения  $Z$  по выражению (9) в этом случае будет неверным (результат соответствует точке 3 на рис. 4) и отличаться от истинного значения на величину

$$\Delta Z = D \operatorname{tg}(\Delta \phi_{\Gamma}), \quad (11)$$

где  $\Delta Z$  – ошибка вычисления бокового отклонения, вызванная погрешностью юстировки ВУ;  $D$  – дальность до ориентира в момент выполнения «ВК» координат ЛА;  $\Delta \phi_{\Gamma}$  – погрешность юстировки ВУ относительно ССК ЛА в горизонтальной плоскости. Соответственно неверно будет рассчитано и значение скорректированного заданного курса  $\psi_{\text{зад}}^*$ . Поэтому ЛА будет двигаться с постоянным боковым отклонением  $\Delta Z$  от ЛЗП, а изображение ориентира будет смещаться относительно НП ВУ. Для реализации метода контроля точности юстировки ВУ предлагается повторно выполнить привязку к ориентире с помощью механизма управления подвижным перекрестием (МУ ПП). При этом угол визирования  $\phi_{\Gamma}$  фиксируется СОК, а величина бокового отклонения  $\Delta Z$  (точка 4 на рис. 4) может быть определена выражением

$$\Delta Z = D_1 \operatorname{tg}(\Delta \phi_{\Gamma} - \phi_{\Gamma}), \quad (12)$$

где  $\Delta Z$  – ошибка вычисления бокового отклонения, вызванная углом  $\Delta \phi_{\Gamma}$ ;  $D_1$  – дальность до ориентира в момент повторной привязки;  $\phi_{\Gamma}$  – угол визирования ориентира в момент повторной привязки. С учетом равенства (11) и (12) погрешность юстировки ВУ будет определяться соотношением

$$\Delta \phi_{\Gamma} = \operatorname{arctg} \left[ \frac{-1 + \frac{D}{D_1} - \sqrt{1 - 2 \frac{D}{D_1} (1 + 2 \operatorname{tg}^2 \phi_{\Gamma}) + \left(\frac{D}{D_1}\right)^2}}{2 \frac{D}{D_1} \operatorname{tg} \phi_{\Gamma}} \right]. \quad (13)$$

Для определения погрешности юстировки ВУ как рассогласования  $\Delta \phi_{\Gamma}$  между нулем оси НП и ССК ЛА используется аналитическая зависимость (13) и данные СОК [12–16].

### Заключение

Полученные в работе результаты научных исследований могут быть использованы при обосновании тактико-технических требований к аппаратуре оперативного контроля ТХ ОЭПрНК, при разработке и обосновании методов управления ТХ в ОТС, методов ТЭ АТ по состоянию с контролем параметров, а также в учебном процессе вузов при подготовке специалистов по эксплуатации технических систем различного назначения.

### Список литературы

1. Зырянов Ю. Т., Малыков К. А. Управление профилактикой в организационно-технических системах : монография / под общ. ред. Ю. Т. Зырянова. М. : АСТ-ПРЕСС КНИГА, 2005. 160 с.
2. Зырянов Ю. Т., Малыков К. А. Планирование профилактики в организационно-технических системах // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2004. Т. 10, № 2. С. 410–420.
3. Зырянов Ю. Т., Малыков К. А. Управление профилактикой в организационно-технических системах // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2004. № 12. С. 54–59.



4. Зырянов Ю. Т., Лебедев В. В., Ледовских Д. Н., Рязанов И. Г. Об одном подходе к формированию смешанной системы управления техническим состоянием радиотехнических средств // Надежность и качество сложных систем. 2017. № 3. С. 49–59. doi:10.21685/2307-4205-2017-3-8
5. Зырянов Ю. Т., Морозов В. В. Формирование облика интегрированной информационно-моделирующей системы оперативной оценки технического состояния бортовых радиоэлектронных комплексов // Журнал ТОАИИ. 2002. № 15. С. 30–34.
6. Пат. 2179303 РФ, МКИ<sup>7</sup> G 01 D 3/06. Устройство контроля параметров бортового комплекса летательного аппарата / Зырянов Ю. Т., Малыков К. А. № 96123966/28 ; заявл. 19.12.96 ; опубл. 10.02.02, Бюл. № 4. 5 с.
7. Пат. RU 2463562 C2. Устройство контроля параметров бортового комплекса летательного аппарата / Зырянов Ю. Т., Малыков К. А., Сухов А. Л. № 2009107655/28 ; заявл. 03.03.2009 ; опубл. 10.10.2012.
8. Зырянов Ю. Т. Оценка влияния погрешностей юстировки лазерного и визирного каналов прицельного комплекса на вероятность определения первичных параметров цели // Радиосистемы. 2004. № 7. С. 57–59.
9. Зырянов Ю. Т., Кириченко А. А. Вероятностный анализ влияния ошибок юстировки на определение первичных параметров цели // Исследование операций и боевая эффективность авиационных комплексов: науч.-метод. материалы / под ред. И. С. Попова. М. : ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 1991. С. 100–103.
10. Зырянов Ю. Т., Кириченко А. А. Оценка закона распределения ошибок юстировки лазерного и визирного каналов прицельной системы // Исследование операций и боевая эффективность авиационных комплексов: науч.-метод. материалы / под ред. И. С. Попова. М. : ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 1991. С. 97–99.
11. Зырянов Ю. Т. Оценивание изменения параметров измерительного устройства динамической системы методом фильтрации // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2004. Т. 2, № 6. С. 31–34.
12. Зырянов Ю. Т., Морозов В. В. Оценка влияния ошибок юстировки оптического визира летательного аппарата на точность решения задачи навигации // Повышение эффективности методов и средств обработки информации : материалы VI Всерос. науч.-техн. конф. (16–19 мая 2000 г.). Тамбов : ТВАИИ, 2000. С. 218–219.
13. Зырянов Ю. Т., Морозов В. В. Оценка влияния точности юстировки оптического визира летательного аппарата на решение задачи навигации с визуальной коррекцией // 20 лет кафедре математического моделирования : сб. тр. Воронеж, 2001. С. 121–124.
14. Зырянов Ю. Т., Морозов В. В. Разработка алгоритмического обеспечения для оценки точностных характеристик бортового радиоэлектронного комплекса при решении задачи навигации с визуальной коррекцией // Материалы научных чтений по авиации, посвященных памяти проф. Н. Е. Жуковского (19–20 марта 2002 г.). М. : ВАТУ, 2002. С. 59–65.
15. Пат. 2183312 РФ, МКИ<sup>7</sup> F 41 G 3/32. Способ контроля точности юстировки прицела летательного аппарата в горизонтальной плоскости / Зырянов Ю. Т., Морозов В. В. № 2000105776/02 ; заявл. 14.03.00 ; опубл. 10.06.02, Бюл. № 16. 5 с.
16. Зырянов Ю. Т. Метод контроля точности юстировки визирного устройства прицельно-навигационного комплекса летательного аппарата в горизонтальной плоскости // Оборонная техника. 2004. № 6. С. 24–26.

### References

1. Zyryanov Yu.T., Malykov K.A. *Upravlenie profilaktikoy v organizatsionno-tehnicheskikh sistemakh: monografiya = Prevention management in organizational and technical systems : monograph*. Moscow: AST-PRESS KNIGA, 2005:160. (In Russ.)
2. Zyryanov Yu.T., Malykov K.A. Planning of prevention in organizational and technical systems. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Tambov State Technical University*. 2004;10(2):410–420. (In Russ.)
3. Zyryanov Yu.T., Malykov K.A. Prevention management in organizational and technical systems. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika = Devices and systems. Management, control, diagnostics*. 2004;(12):54–59. (In Russ.)
4. Zyryanov Yu.T., Lebedev V.V., Ledovskikh D.N., Ryazanov I.G. On one approach to the formation of a mixed control system for the technical condition of radio equipment. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2017;(3):49–59. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2017-3-8
5. Zyryanov Yu.T., Morozov V.V. Formation of the appearance of an integrated information modeling system for operational assessment of the technical condition of on-board radio-electronic complexes. *Zhurnal TOAII = Journal of TOAI*. 2002;(15):30–34. (In Russ.)
6. Patent 2179303 Russian Federation, MКИ 7 G 01 D 3/06. *Ustroystvo kontrolya parametrov bortovogo kompleksa letatel'nogo apparata = The device for monitoring the parameters of the on-board complex of the aircraft*. Zyryanov Yu.T., Malykov K.A. № 96123966/28; appl. 19.12.96; publ. 10.02.02, Bull. № 4. 5 p. (In Russ.)
7. Patent Russian Federation 2463562 C2. *Ustroystvo kontrolya parametrov bortovogo kompleksa letatel'nogo apparata = The device for monitoring the parameters of the on-board complex of the aircraft*. Zyryanov Yu.T., Malykov K.A., Sukhov A.L. № 2009107655/28; appl. 03.03.2009; publ. 10.10.2012. (In Russ.)
8. Zyryanov Yu.T. Assessment of the influence of errors in the alignment of the laser and sighting channels of the sighting complex on the probability of determining the primary parameters of the target. *Radiosistemy = Radio systems*. 2004;(7):57–59. (In Russ.)

9. Zyryanov Yu.T., Kirichenko A.A. Probabilistic analysis of the influence of alignment errors on the determination of primary target parameters. *Issledovanie operatsiy i boevaya effektivnost' aviatsionnykh kompleksov: nauch.-metod. materialy* = *Operations research and combat effectiveness of aviation complexes: scientific method. materials*. Moscow: VVIA im. prof. N.E. Zhukovskogo, 1991:100–103. (In Russ.)
10. Zyryanov Yu.T., Kirichenko A.A. Evaluation of the distribution law of errors in the alignment of the laser and sighting channels of the sighting system. *Issledovanie operatsiy i boevaya effektivnost' aviatsionnykh kompleksov: nauch.-metod. materialy* = *Research of operations and combat effectiveness of aviation complexes: scientific method. materials*. Moscow: VVIA im. prof. N.E. Zhukovskogo, 1991:97–99. (In Russ.)
11. Zyryanov Yu.T. Estimation of changes in the parameters of the measuring device of a dynamic system by filtration method. *Informatsionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy* = *Information-measuring and control systems*. 2004;2(6):31–34. (In Russ.)
12. Zyryanov Yu.T., Morozov V.V. Assessment of the influence of errors in the alignment of the optical sight of an aircraft on the accuracy of solving the navigation problem. *Povyshenie effektivnosti metodov i sredstv obrabotki informatsii: materialy VI Vseros. nauch.-tekhn. konf. (16–19 maya 2000 g.)* = *Improving the efficiency of methods and means of information processing : materials of the VI All-Russian scientific and technical. conf. (May 16–19, 2000)*. Tambov: TVAI, 2000:218–219. (In Russ.)
13. Zyryanov Yu.T., Morozov V.V. Assessment of the influence of the accuracy of the alignment of the optical sight of the aircraft on the solution of the problem of navigation with visual correction. *20 let kafedre matematicheskogo modelirovaniya: sb. tr. = 20 years of the Department of Mathematical modeling : proceedings*. Voronezh, 2001:121–124. (In Russ.)
14. Zyryanov Yu.T., Morozov V.V. Development of algorithmic support for assessing the accuracy characteristics of an on-board radio-electronic complex when solving the problem of navigation with visual correction. *Materialy nauchnykh chteniy po aviatsii, posvyashchennykh pamyati prof. N.E. Zhukovskogo (19–20 marta 2002 g.)* = *Materials of scientific readings on aviation dedicated to the memory of Prof. N. E. Zhukovsky (March 19-20, 2002)*. Moscow: VATU, 2002:59–65. (In Russ.)
15. Patent 2183312 Russian Federation, MKI 7 F 41 G 3/32. *Sposob kontrolya tochnosti yustirovki pritsela letatel'nogo apparata v gorizont'noy ploskosti* = *A method for controlling the accuracy of adjusting the sight of an aircraft in a horizontal plane*. Zyryanov Yu.T., Morozov V.V. № 2000105776/02; appl. 14.03.00; publ. 10.06.02, Bull. № 16. 5 p. (In Russ.)
16. Zyryanov Yu.T. Method for controlling the accuracy of alignment of the sighting device of the sighting and navigation complex of the aircraft in the horizontal plane. *Oboronnaya tekhnika* = *Defense technology*. 2004;(6):24–26. (In Russ.)

### Информация об авторах / Information about the authors

#### Юрий Трифионович Зырянов

доктор технических наук, профессор,  
 профессор кафедры конструирования  
 радиоэлектронных и микропроцессорных систем,  
 Тамбовский государственный технический университет  
 (Россия, г. Тамбов, ул. Советская, 106)  
 E-mail: zut-tmb@mail.ru

#### Yury T. Zyryanov

Doctor of technical sciences, professor,  
 professor of the sub-department of design  
 of radioelectronic and microprocessor systems,  
 Tambov State Technical University  
 (106 Sovetskaya street, Tambov, Russia)

**Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов /  
 The author declares no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию / Received 14.03.2023**

**Поступила после рецензирования / Revised 02.04.2023**

**Принята к публикации / Accepted 09.05.2023**