

УДК 519.876.5

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМПЛЕКСОВ СВЕТОСИГНАЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ АЭРОДРОМОВ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПОСАДКИ В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕННОЙ ВИДИМОСТИ

Ю.Т. ЗЫРЯНОВ, В.М. ДМИТРИЕВ

В статье представлен один из подходов к решению актуальной научно-прикладной задачи - оценки эффективности комплексов светосигнального оборудования аэродромов в условиях ограниченной видимости с применением интегрального показателя на основе моделирования развития визуального контакта летчика со светосигнальной картиной аэродрома.

Ключевые слова: оценка эффективности, ограниченная видимость, визуальный контакт, светосигнальная картина, комплекс светосигнального оборудования.

Введение

Обеспечение безопасности, регулярности и эффективности полетов авиации зависит от многих факторов, обусловленных внешней средой, соотношением сил и средств, уровнем подготовки летного состава и характеристиками оборудования.

По статистике более 50% авиационных происшествий (и инцидентов) происходит во время посадки, на этапе визуального пилотирования из-за потери ориентирования экипажем воздушного судна (ВС). Так, в течение последних 10 лет произошло более 10 авиационных происшествий, причины которых связаны с отсутствием либо потерей экипажем визуального контакта с наземными ориентирами.

Комплекс светосигнального оборудования (КССО) аэродрома обеспечивает командира ВС (КВС) световыми ориентирами на заключительном этапе посадки, так как безопасная посадка невозможна без наличия надежного визуального контакта с огнями светосигнальной системы.

Для ускорения и снижения стоимости разработки новых и модернизации существующих КССО при обеспечении нормированного уровня безопасности полетов, а также для расследования авиационных происшествий и инцидентов целесообразно использовать методы и средства компьютерного моделирования.

1. Формализованная постановка задачи

Под эффективностью применения КССО аэродрома понимается степень его приспособленности к выполнению стоящей перед ним задачи. Основной задачей, решаемой КССО, является обеспечение экипажа ВС визуальной информацией для определения отклонения ВС от заданной линии курса и глиссады при посадке, а также определения положения ВС на взлетно-посадочной полосе (ВПП) и рулёжных дорожках аэродрома.

Исходя из анализа процесса посадки ВС на экспериментальный аэродром (ЭА) в условиях I и II категории метеоминимума, ее можно разделить на два основных этапа: пилотирование по приборам до достижения нижней границы облачности и визуальное пилотирование после выхода из облаков и установки визуального контакта с КССО ЭА.

Этап пилотирования по приборам основывается на непрерывном измерении величин отклонения самолета от равносигнальных направлений линий курса и глиссады. Основным источником информации о положении ВС до момента выхода из нижней границы облаков является инструментальная система посадки (ИСП).

В результате пилотирования по приборам ВС должно быть выведено в определенную область пространства перед ВПП, в которой КВС визуально оценивает качество захода на посадку.

ку. Если отклонения по высоте или боковые отклонения превысят допустимые значения, то принимается решение об уходе на второй круг или на запасной аэродром.

Для оценки эффективности функционирования КССО ЭА целесообразно использовать интегральный показатель, который позволит учитывать динамику развития визуального контакта летчика с КССО ЭА в зависимости от вышеописанных факторов.

На основе анализа процесса посадки были выделены факторы [1; 2], влияющие на эффективность применения КССО ЭА в условиях ограниченной видимости, которые объединены в следующие группы факторов: характеристики средств радиотехнического обеспечения (РТО) полетов, характеристики КССО ЭА, уровень подготовки КВС (экипажа), характеристики ВС, метеоусловия.

Для каждой группы факторов были выделены параметры, характеризующие данную группу факторов.

В результате исходными данными для решения задачи оценки эффективности КССО ЭА в условиях ограниченной видимости выбраны:

1. Характеристики КССО ЭА: СПО – схема размещения огней; параметры для каждого огня (I_0 – осевая сила света огня; θ_Y , θ_Z – углы наклона осевой линии огня; θ_{Y0} , θ_{Z0} – ширина диаграммы излучения; C – цвет излучения огня).

2. Метеорологические параметры: $D_{МОДВ}$ – метеорологическая оптическая дальность видимости; $H_{ВНГО}$ – высота нижней границы облачности; $f(\varphi)$ – индикатриса рассеяния; L_{φ_3} – яркость фона земной поверхности; L_n – яркость неба на горизонте.

3. Посадочные характеристики ВС: V_{noc} – посадочная скорость ВС; ν – угол тангажа; $\varphi_{обз}$ – угол обзора из кабины по линии вперед-вниз; σ_{yBC} , σ_{zBC} – точность выдерживания ВС посадочной траектории по курсу и глиссаде.

4. Характеристики средств РТО: РТП – расчетная точка посадки; H_{MBC} – минимальная высота снижения; α_0 – угловая ошибка по курсу; θ_{zl} – угол наклона глиссады; θ_0 – угловая ошибка по глиссаде; $\sigma_{yСП}$, $\sigma_{zСП}$ – точность выдерживания системой посадки линии курса и глиссады.

5. Уровень подготовки и состояние летчика: ε – пороговый контраст; $T_{ДР}$ – время принятия решения.

Таким образом, для оценки эффективности необходимо решить задачу об определении наиболее информативного показателя эффективности из функции вида

$$W = f(\vec{X}), \quad (1)$$

где \vec{X} – вектор исходных данных.

Результатом решения данной задачи будет выбор интегрального показателя эффективности, учитывающего максимальное количество параметров доминирующих факторов, влияющих на характеристики видимости светосигнальной картины (ССК) ЭА в процессе посадки ВС в условиях ограниченной видимости.

2. Разработка математической модели ССК ВА и алгоритма расчета ее параметров

Для оценки видимости огня необходимо определить освещенность сетчатки глаза $E_{\text{глаза}}$, создаваемую огнем, и ее пороговое значение $E_{\text{пор}}$.

Для определения освещенности сетчатки глаза КВС была использована формула

$$E_{\text{глаза}} = \frac{I(\theta_Y, \theta_Z) \cdot e^{-\alpha l}}{l^2}, \quad (2)$$

где $I(\theta_Y, \theta_Z)$ – интенсивность излучения огня КССО с учетом диаграммы излучения огня в вертикальной и горизонтальной плоскости; θ_Y, θ_Z – углы между осевой линией огня и направлением визирования в горизонтальной и вертикальной плоскости; l – расстояние до текущего огня визирования; α – показатель ослабления света в атмосфере.

Для определения α использовалось выражение $\alpha = \frac{3,9}{D_{МДВ}}$, где $D_{МДВ}$ – метеорологическая дальность видимости.

Для существующих СРО КССО ЭА (ССП-1,2; ОВИ-1,2,3) с огнями фарного и прожекторного типа для определения диаграммы излучения $I(\theta_Y, \theta_Z)$ используется выражение

$$I(\theta_Y, \theta_Z) = I_0 e^{-\left[\left(\frac{\theta_Y}{\theta_{Y0}}\right)^2 + \left(\frac{\theta_Z}{\theta_{Z0}}\right)^2\right]} \quad (3)$$

Критерием обнаружения огня КССО ЭА выбрано превышение освещенности сетчатки глаза КВС $E_{\text{глаза}}$ над пороговым уровнем освещенности $E_{\text{пор}}$.

Наблюдение световых сигналов постоянного и импульсного действия осуществляется при некотором уровне фоновой яркости L_ϕ . Каждому L_ϕ соответствует определенное значение пороговой освещенности сетчатки глаза $E_{\text{пор}}$. Поскольку пороги цветоощущения выше световых порогов, то на значительных расстояниях цветные огни воспринимаются белыми и приобретают свой цвет по мере приближения к ним наблюдателя. Суммарная яркость фона будет равна сумме ее составляющих

$$L_\phi = L_{\phi3} e^{-\alpha \cdot D_\phi} + L_n \left[1 - e^{-\alpha \cdot D_\phi} \right] + L_{\text{глаза}} + L_{\text{атм}}, \quad (4)$$

где D_ϕ – расстояние от фона до точки наблюдения.

Влияние времени суток и вида подстилающей поверхности на яркость фона определяется через L_n и $L_{\phi3}$, которые входят в формулу (4). Причем $L_{\phi3}$ определяются не только видом подстилающей поверхности, но и временем суток. Численные значения L_n и $L_{\phi3}$ могут быть определены на аэродроме путем непосредственного измерения этих величин.

Составляющая яркости фона $L_{\text{глаза}}$ создается за счет физического процесса рассеяния света от источников в глазу летчика и зависит от количества огней, попадающих в поле его зрения. Ее значение рассчитывалось по формуле

$$L_{\text{глаза}} = \sum_{i=1}^m \frac{29 \cdot I_i(\theta_i) \cdot e^{-\alpha \cdot l_{i21}}}{l_{i21}^2 \cdot \Psi_i^{2,8}}, \quad (5)$$

где m – количество огней, попадающих в поле зрения летчика; $I_i(\theta_i)$ – диаграмма излучения i -го аэродромного огня; α – показатель ослабления света в атмосфере; l_{i21} – расстояние i -го огня до глаза летчика; Ψ_i – угол фиксации i -го огня летчиком.

Так как на ЭА в зависимости от СРО может использоваться свыше 100 огней, то $L_{\text{глаза}}$ оказывает существенное влияние на яркость фона.

Для определения $L_{\text{атм}}$ использовалось выражение

$$\Delta L_{ij\text{атм.}} = -\alpha \cdot \frac{f(\varphi_{ij}) \cdot I_i(\theta_{ij}) \cdot e^{-\alpha(l_{ij1} + l_{ij2})}}{4 \cdot \pi \cdot l_{ij1}^2 \cdot \cos \varphi_{ij}} \cdot \Delta l_{ij1}, \quad (6)$$

где $f(\varphi_{ij})$ – индикатриса рассеяния; φ_{ij} – угол между заданным направлением наблюдения и направлением распространения излучения; l_{ij1} – расстояние от прожектора i до рассматриваемого слоя атмосферы j , которое отличается от предыдущего значения на величину Δl_{ij1} ; l_{ij2} – расстояние от рассматриваемого слоя атмосферы до глаза КВС.

Просуммировав значения яркости для всех огней по всем участкам атмосферного слоя в направлении линии визирования наблюдателя, получим общую яркость $L_{атм}$, равную

$$L_{атм} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \Delta L_{ijатм}, \quad (7)$$

где m – количество огней, попадающих в поле зрения летчика; n – количество элементарных отрезков.

Для расчета параметров ССК ЭА был разработан алгоритм [1], основной задачей которого является определение видимости огней из всех точек траектории посадки. Решение о видимости огня принимается в случае, если освещенность сетчатки глаза больше светового порога освещенности, а решение о различении цвета огня в случае, если освещенность сетчатки глаза больше цветового порога освещенности. В результате оценки видимости отдельных огней из данной точки траектории посадки составляется карта видимости огней, которая и представляет собой ССК ЭА, наблюдаемую из заданной точки траектории посадки. С использованием алгоритма расчета параметров ССК ЭА были проведены численные эксперименты с целью выявления влияния доминирующих факторов на видимость ССК ЭА.

3. Обоснование показателя эффективности КССО ЭА

С учетом [3] разработан алгоритм расчета параметров визуального контакта КВС со ССК ЭА, состоящий из следующих этапов:

1 этап: ввод условий посадки. На этом этапе вводятся такие параметры, как характеристики средств РТО, характеристики КССО ЭА, уровень подготовки КВС, характеристики ВС, метеословия (подробно представлено) в формализованной постановке задачи.

2 этап: расчёт начальных координат. Для учёта стохастического характера процесса посадки для расчета начальных координат предлагается следующая модель:

$$\begin{cases} y = D_{рпп} \cdot \operatorname{tg} \alpha_0 + y_{сп} + y_{вс}; \\ z = D_{рпп} \cdot \operatorname{tg}(\theta_{21} + \theta_0) + z_{сп} + z_{вс}, \end{cases} \quad (8)$$

где $D_{рпп}$ – дальность до расчётной точки посадки; $y_{сп}$ и $z_{сп}$ – случайные величины отклонений, обусловленные ТТХ наземной части ИСП; $y_{вс}$ и $z_{вс}$ – случайные величины отклонений, определяемые точностью выдерживания ВС линий курса и глиссады. Случайные величины отклонений подчинены нормальному закону распределения.

Реализация $y_{сп}$, $z_{сп}$, $y_{вс}$, $z_{вс}$ происходит методом Монте-Карло при нормальном распределении со следующими условиями

$$\begin{cases} M[y_{сп}] = 0; D[y_{сп}] = \sigma_{сп}^2; \\ M[z_{сп}] = 0; D[z_{сп}] = \sigma_{зсп}^2; \\ M[y_{вс}] = 0; D[y_{вс}] = \sigma_{ывс}^2; \\ M[z_{вс}] = 0; D[z_{вс}] = \sigma_{звс}^2. \end{cases} \quad (9)$$

3 этап: расчет текущих координат. Так как экспериментально полученные математическое ожидание и среднеквадратические отклонения по курсу и глиссаде на различных удалени-

ях в процессе посадки меняются незначительно, то реальная посадочная траектория движения ВС заменена прямолинейной моделью:

$$\begin{cases} x_i = x_{i-1} - V_{noc} \cdot \Delta t \cdot \cos(\theta_{zt} + \theta_0) \cdot \cos \alpha_0; \\ y_i = y_{i-1} - V_{noc} \cdot \Delta t \cdot \cos(\theta_{zt} + \theta_0) \cdot \sin \alpha_0; \\ z_i = z_{i-1} - V_{noc} \cdot \Delta t \cdot \sin \alpha_0, \end{cases} \quad (10)$$

где $X(t_i)$ (x_i, y_i, z_i) – текущие координаты ВС; $X(t_{i-1})$ ($x_{i-1}, y_{i-1}, z_{i-1}$) – предыдущие координаты ВС; Δt – время.

4 этап: определение параметров визуального контакта. Для текущей точки траектории посадки рассчитывается ССК ЭА и определяется выполнение условия визуального контакта, а именно видимости 2-3 рядов огней в направлении посадки. В качестве результата функционирования алгоритм выдает информацию о количестве видимых огней, их расположении и выполнении условия визуального контакта для текущей точки траектории посадки.

Реализация 3 и 4 этапов имеет циклический характер и повторяется до приземления ВС.

В результате выполнения алгоритма будет получена информация о параметрах визуального контакта для каждой точки траектории посадки.

В качестве параметра визуального контакта для текущей точки траектории посадки предложено использовать $L(X(t))$ – длину участка видимых огней по направлению оси ВПП (в глубину) из данной точки траектории посадки $X(t)$.

Для определения величины отклонений от заданного курса и глиссады КВС необходимо одновременно наблюдать 2-3 ряда огней в направлении посадки.

При принятии решения на посадку в условиях ограниченной видимости КВС вынужден действовать без визуального контакта с ориентирами ВПП. Он принимает решение, ориентируясь лишь на наличие визуального контакта с огнями приближения и с огнями светового горизонта. Поэтому на основе анализа процесса посадки в условиях ограниченной видимости в качестве интегрального показателя эффективности предлагается использовать **вероятность наличия визуального контакта на высоте не ниже требуемой**

$$H_{BVK\text{треб}} = H_{ВПП} + V_{сн} \cdot T_{ПР}, \quad (11)$$

где $V_{сн}$ – вертикальная составляющая посадочной скорости ВС.

Определено, что $T_{ПР}$ принимает значение от 3 до 5 секунд, поэтому значение $H_{BVK\text{треб}}$ может варьироваться от $H_{BVK\text{min}}$ до $H_{BVK\text{max}}$.

В результате применения разработанного алгоритмического обеспечения будет получена случайная величина, подчиненная нормальному закону распределения, с математическим ожиданием $H_{BVK\text{прогноз}}$ и СКО σ .

Вероятность наличия визуального контакта на высоте не ниже требуемой определяется выражением

$$P_{BK} = P(H_{BVK} > H_{BVK\text{треб}}). \quad (12)$$

Синтезированные модели и алгоритмы оформлены в виде пакетов прикладных программ для ЭВМ (наглядно-демонстрационного характера в среде Delphi 7.0 и инженерно-расчетного в среде Mat lab 7.0) [4; 5].

На основе анализа результатов моделирования процесса посадки и оценки P_{BK} для различных условий в качестве критерия выполнения успешной посадки была выбрана $P_{BK} \geq 0,9$, как обеспечивающая достаточный запас высоты ($H_{BVK} - H_{BVK\text{треб}} \geq \sigma$).

Пример реализации разработанных алгоритмов иллюстрируется результатами моделирования развития визуального контакта (ВК) и оценки вероятности наличия ВК КВС при посадке ВС (рис. 1, 2).

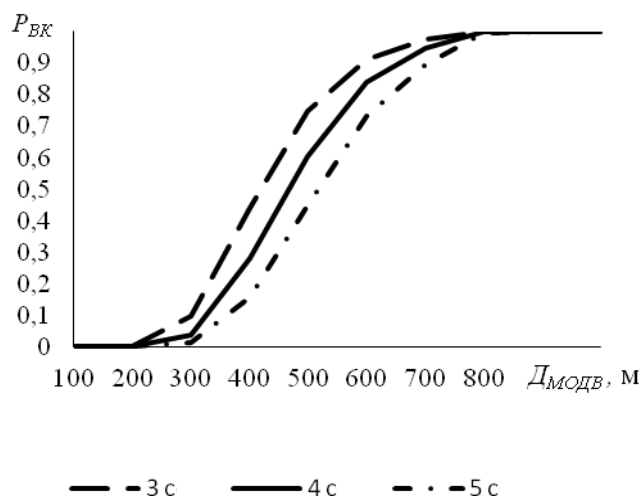


Рис. 1. Оценка вероятности наличия визуального контакта ночью

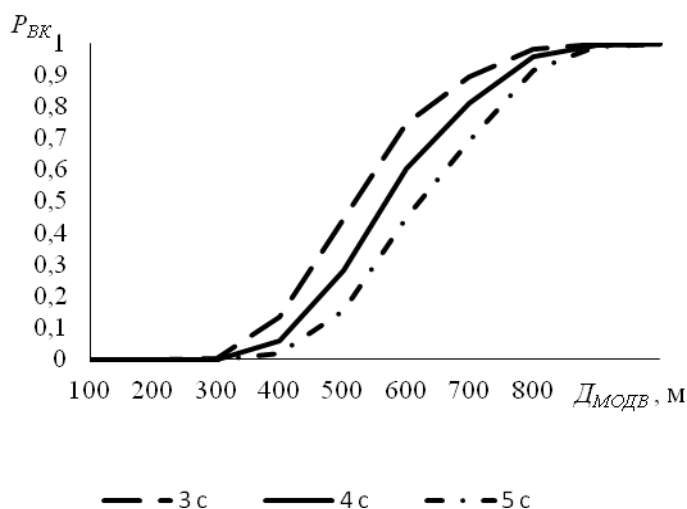


Рис. 2. Оценка вероятности наличия визуального контакта днем

Если в качестве критерия возможности выполнения посадки выбрать $P_{ВК} \geq 0,9$, то для $T_{ПР} = 3 с$ условие будет выполнено ночью уже при $D_{МОДВ} = 600 м$, а для летчиков с $T_{ПР} = 4 - 5 с$ это условие будет выполнено при $D_{МОДВ} = 700$ и $800 м$ соответственно. Днем в связи со значительной яркостью фона условие $P_{ВК} \geq 0,9$ будет выполнено лишь при $D_{МОДВ} = 800 м$.

Оценка эффективности разработанного алгоритмического обеспечения показала, что его применение позволяет экономить от 28% до 40% времени летной проверки при облетах РТО и КССО ЭА в зависимости от типа СРО КССО, как это показано на рис. 3.

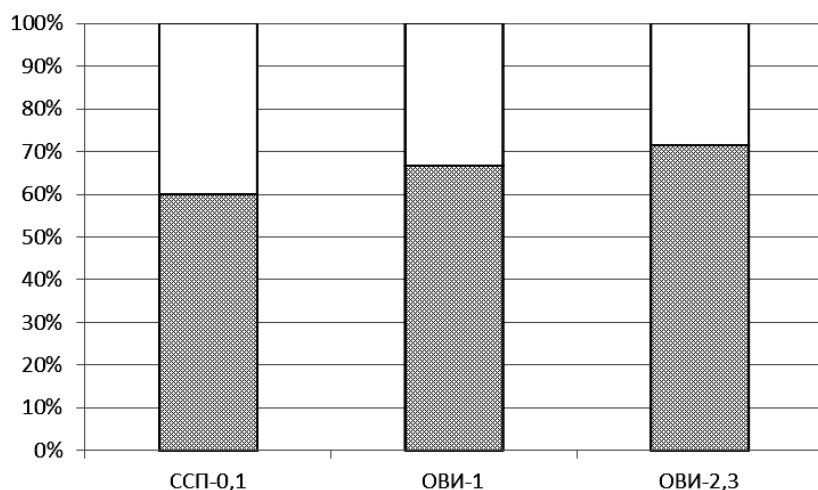


Рис. 3. Расчетное время, необходимое для облета КССО ЭА

На рис. 3 незаштрихованные области показывают процент экономии времени летной проверки.

Заключение

Таким образом, разработанное алгоритмическое и программное обеспечение применимо для оценки эффективности КССО ЭА в условиях ограниченной видимости с учетом влияния таких групп факторов, как характеристики РТО, характеристики КССО, посадочные характеристики ВС, метеорологические условия, уровень подготовки КВС. Выбранный интегральный показатель эффективности позволяет учесть комплексное влияние указанных групп факторов на качество решения КССО ЭА задачи обеспечения экипажа ВС визуальной информацией при выполнении посадки в условиях ограниченной видимости.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Зырянов Ю.Т., Дмитриев В.М.** Моделирование и исследование влияния доминирующих факторов на видимость светосигнальной картины аэродрома // Научный Вестник МГТУ ГА. - 2010. - № 152. - С. 99–107.
- 2. Зырянов Ю.Т., Дмитриев В.М., Волков В.В.** Энергосберегающие технологии в проектировании и эксплуатации комплексов светосигнального оборудования аэродромов // Энергобезопасность и энергосбережение. - 2011. - № 2. - С. 22-26.
- 3. Зырянов Ю.Т., Дмитриев В.М., Ледовских Д.Н.** К вопросу об оценке эффективности радиосветотехнического оборудования аэродрома // Авиакосмическое приборостроение. - 2011. - № 8. - С. 31-37.
- 4. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ 2011618625 Российская Федерация.** Программа расчета параметров математической модели светосигнальной картины аэродрома / Дмитриев В.М. (RU); правообладатель Дмитриев В.М. - № 2011616871; заявл. 13.09.11.; зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 2.11.11.
- 5. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ 2011618624 Российская Федерация.** Программа для оценки эффективности применения комплексов светосигнального оборудования аэродрома в сложных метеоусловиях. Дмитриев В.М., Зырянов Ю.Т., Малыков К.А. (RU); правообладатели Дмитриев В.М., Зырянов Ю.Т., Малыков К.А. - № 2011616870; заявл. 13.09.11.; зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 2.11.2011.

**AIRFIELD RUNWAY LIGHTING EFFICIENCY ESTIMATING BASED
ON SIMULATING LANDING PROCESS IN LOW VISIBILITY**

Zyryanov Yu.T., Dmitriev V.M.

The paper presents an approach to solving important scientific application at the evaluation of the effectiveness of airfields runway lighting in low visibility conditions using the integral index-based fashion.

Key words: efficiency estimating, low visibility, visual contact, lighting picture, runway lighting.

Сведения об авторах

Зырянов Юрий Трифонович, 1960 г.р., окончил Тамбовское ВВАИУ (1983), профессор, доктор технических наук, почетный работник высшего профессионального образования РФ, член-корреспондент РАЕ, профессор ФГБОУ ВПО ТГТУ, автор более 120 научных работ, область научных интересов – управление состоянием организационно-технических систем при ограниченных ресурсах.

Дмитриев Владимир Михайлович, 1984 г.р., окончил Тамбовское ВВАИУРЭ (2006), кандидат технических наук, преподаватель ФГКВОУ ВПО ВУНЦ ВВС «ВВА», автор более 20 научных работ, область научных интересов – повышение эффективности комплексов радиосветотехнического оборудования аэродромов.