



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.371.344; 621.396.969.1

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-4-5>

Методика оценки сокращенных критических зон радиомаяков системы посадки ILS на примере аэродрома Горно-Алтайск



Евгений РУБЦОВ



Сергей КУДРЯКОВ



Яков ДАЛИНГЕР

Евгений Андреевич Рубцов¹, Сергей Алексеевич Кудряков², Яков Михайлович Далингер³

^{1, 2, 3} Российский университет транспорта, Москва, Россия.

✉ ¹ rubtsov.rut.miit@yandex.ru.

✉ ² psi_center@mail.ru.

✉ ³ iakovdalinger@gmail.com.

¹ SPIN-код: 5832-3060, ORCID 0000-0003-2126-0015.

² Scopus Author ID: 57194207063, ORCID 0000-0002-1303-3528.

³ SPIN-код: 8895-3700, Scopus Author ID: 57195278185, ORCID 0000-0002-7744-7156.

АННОТАЦИЯ

Проанализированы рекомендации Международной организации гражданской авиации, направленные на обоснованное уменьшение размеров критических зон. Выявлены недостатки существующих требований Федеральных авиационных правил к критическим зонам радиомаяков системы посадки ILS. Разработана методика, позволяющая оценить искривления линий курса и глиссады для сокращенных критических зон. При этом оценивается влияние на работу радиомаяков системы посадки ILS различных объектов-отражателей, расположенных на рабочей площади аэродрома, а также на приаэродромной территории.

Отражатели могут быть аппроксимированы моделями стеньки (имитирует отражения от зданий, мостов, заборов),

цилиндра (имитирует отражения от заводских труб, цистерн, емкостей, фюзеляжей воздушных судов) и полусферического диффузного отражателя (имитирует отражение от возвышенностей рельефа).

Произведена апробация методики для аэродрома Горно-Алтайск и разработано предложение по сокращению критической зоны курсового радиомаяка, что позволит расширить перрон на 35 м, устранить проблемы с ограничением скорости и блокированием движения самолетов по рулежной дорожке. При этом вероятность отказа в обслуживании самолетов снизится в 3...11 раз, а время занятости взлетно-посадочной полосы уменьшится на 12,5...26 % по сравнению с существующими характеристиками.

Ключевые слова: воздушный транспорт, безопасность полётов, аэродром, посадка воздушных судов, радиомаячная система посадки, критическая зона, рабочая площадь аэродрома.

Для цитирования: Рубцов Е. А., Кудряков С. А., Далингер Я. М. Методика оценки сокращенных критических зон радиомаяков системы посадки ILS на примере аэродрома Горно-Алтайск // Мир транспорта. 2023. Т. 21. № 4 (107). С. 40–52. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-4-5>.

Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.
The full text of the article in English is published in the second part of the issue.

ВВЕДЕНИЕ

Воздушный транспорт остаётся одной из ведущих отраслей экономики Российской Федерации. Современный этап развития авиационной техники характеризуется широким внедрением современных радиоэлектронных средств для обеспечения безопасности полётов. Статистика показывает, что порядка 60 % авиационных происшествий происходит при заходе на посадку и посадке воздушных судов (ВС) [1]. Поэтому особенно высокие требования предъявляются к радиотехническим системам посадки, в частности, к наиболее широко применяемым радиомаячным системам (РМС), которые в международных источниках обозначаются как ILS (instrument landing system). Радиомаячные системы способны обеспечить точную посадку по категориям I, II и IIIА.¹

Для формирования требуемой диаграммы направленности антенн (ДНА) радиомаяков системы ILS и минимизации пересвечиваний радиоволн от местных предметов, вводятся регламентированные и критические зоны. Согласно рекомендациям Международной организации гражданской авиации (ИКАО) необходимо также учитывать чувствительные зоны².

В пределах регламентированных зон предъявляются требования к микрорельефу и уклону местности, а также высоте травяного или снежного покрова. Размеры регламентированных зон приводятся в технической документации, разрабатываемой предприятием-изготовителем системы ILS.

¹ Кудряков С. А., Кульчицкий В. К., Поваренкин Н. В. [и др.] Радиотехническое обеспечение полётов воздушных судов и авиационная электросвязь. – М.: ООО «Научно-издательский центр ИНФРА-М», 2021. – 299 с.

² Авиационная электросвязь. Том 1 Радионавигационные средства. Приложение 10 к Конвенции о международной гражданской авиации. Издание седьмое. – 2018. ИКАО. – 698 с.

В пределах критической зоны запрещается нахождение каких-либо объектов (кроме стоек светосигнального оборудования), поскольку это оказывает влияние на безопасность захода на посадку. Объекты, оказавшиеся в пределах чувствительной зоны, могут оказать влияние на безопасность, и нахождение их нежелательно. На аэродромах России чувствительные зоны не учитывают. Размеры критических зон курсового (КРМ) и глиссадного (ГРМ) радиомаяков системы посадки ILS приведены в федеральных авиационных правилах «Радиотехническое обеспечение полётов воздушных судов и авиационная электросвязь в гражданской авиации» (ФАП-297) (рис. 1).

Недостатком существующих требований является то, что размеры критических зон постоянны, а их изменение возможно только в случае переноса позиции радиомаяка, изменения параметров взлетно-посадочной полосы (перенос торца, изменение ширины), а также при вводе нового угла глиссады.

В то же время ИКАО рекомендует для современных систем ILS уменьшить размеры критических и чувствительных зон и делать их границы изменяемыми в зависимости от размеров объекта, нарушающего зону.

В документах ИКАО² приведены схемы критических зон для КРМ и ГРМ (рис. 2). Размеры зон (X_K, Y_K, X_T, Y_T) не постоянны и зависят от вида мешающего объекта (автомобиль, ВС) и его габаритов, а также от типа антенной системы радиомаяка.

Рекомендация ИКАО по уменьшению размеров критических зон вызвана необходимостью увеличения пропускной способности аэродрома за счёт сокращения времени выруливания ВС на взлетно-посадочную полосу (ВПП), увеличения количества мест стоянки (МС), а также оптимизации движе-



Рис. 1. Критические зоны КРМ и ГРМ (размеры приведены в метрах) согласно требованиям ФАП-297.





Рис. 2. Критические зоны КРМ и ГРМ, согласно рекомендациям ИКАО.

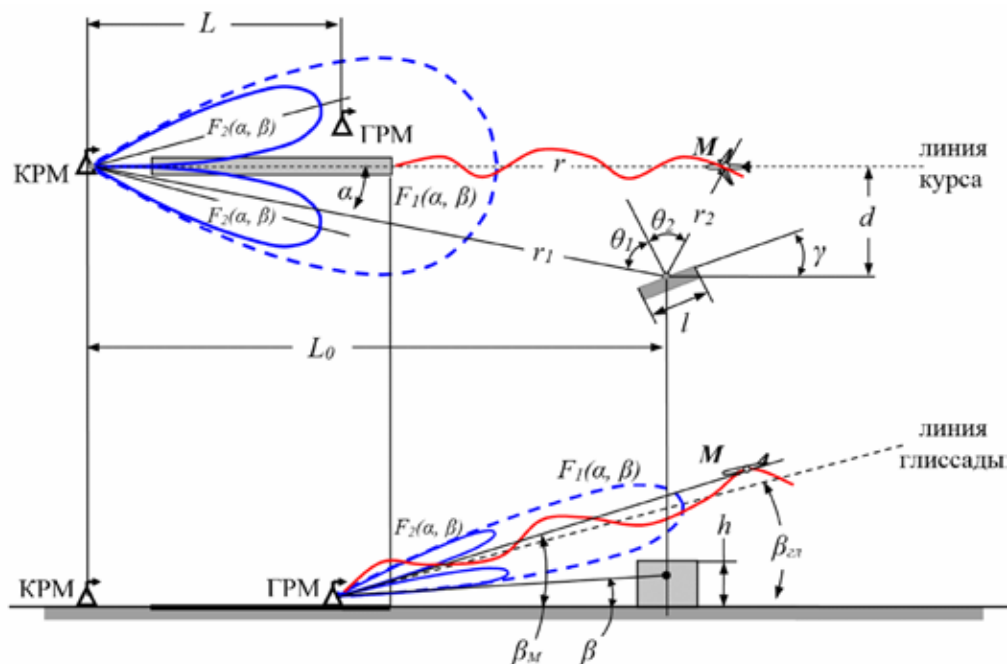


Рис. 3. Искривление линий курса и глиссады РМС, вызванные переотражением сигналов от объекта.

ния автотранспорта и спецтехники по рулежным дорожкам (РД). При этом рекомендуется производить моделирование влияния объектов на работу системы ILS и проводить специальные лётные проверки для подтверждения требуемого уровня безопасности полётов.

Актуальной является задача разработки методов определения размеров критических зон, позволяющих свести к минимуму программу лётных проверок, а в ряде случаев отказаться от них.

Целью исследования, изложенного в статье, является разработка методики оценки влияния объектов на рабочей площади аэродрома, позволяющая установить размеры критической зоны радиомаяков системы ILS согласно рекомендациям ИКАО.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

На работу КРМ и ГРМ могут оказывать влияние сигналы, переотражённые различными объектами, которые могут располагаться на приаэродромной территории [2, 3], а также на рабочей площади аэродрома [4]. Объект-отражатель может оказывать влияние на работу радиомаяков системы ILS, что выражается в наблюдаемом искривлении задаваемой посадочной траектории (линии курса и глиссады). Величина искривлений определяется путём расчёта отклонения от значений разности глубин модуляции (РГМ) в точках задаваемой траектории посадки. Схематичное изображение искривлённой линии курса и глиссады показано на рис. 3 [4].

Напряжённость поля прямого и отражённого сигналов в точке приёма (точка М на

рис. 3) определяется формой ДНА радиомаяка. У радиомаяков с опорным нулём это однопестковая диаграмма $F_1(\alpha, \beta)$ – для канала суммарного сигнала и двухпестковая $F_2(\alpha, \beta)$ – для канала разностного сигнала, где α – угол в горизонтальной плоскости, отсчитываемый от оси ВПП; β – угол в вертикальной плоскости, отсчитываемый вверх от порога ВПП.

Величина РГМ в точке приёма М (рис. 3) при наличии некоторого i -го отражателя определяется выражением [4–8]:

$$РГМ = m \frac{E_{m2}}{E_{m1}} \cdot \frac{F_2(\alpha, \beta_M) + F_2(\alpha, \beta) k_{отр} \cos \psi_i}{F_1(\alpha, \beta_M) + F_1(\alpha, \beta) k_{отр} \cos \psi_i}, \quad (1)$$

где m – коэффициент амплитудной модуляции (0,2 для КРМ и 0,4 для ГРМ);

E_{m2} / E_{m1} – отношение напряжённостей полей, создаваемых разностным и суммарным каналами;

A – угол в горизонтальной плоскости, отсчитываемый от оси ВПП, град;

β – угол места отражателя, наблюдаемого из точки размещения радиомаяка, град.;

β_M – угол места точки М, наблюдаемой из точки размещения радиомаяка, град.;

$k_{отр}$ – коэффициент отражения;

h – высота фазового центра антенны радиолокатора, м;

Ψ – фазовый сдвиг между прямым и отражённым от объекта сигналами в точке М, град.

В случае полёта по глиссаде угол θ будет равен нулю, а угол β – углу наклона глиссады (β_0). Тогда искривления, выраженные в РГМ, определяются как [4–8]:

1) для КРМ:

$$РГМ = m \frac{E_{m2}}{E_{m1}} \cdot \frac{F_2(\alpha; \beta) \cdot \rho \cdot \frac{r}{r_1 \cdot r_2} \cdot \cos \psi}{F_1(0; \beta_0) + F_1(\alpha; \beta) \cdot \rho \cdot \frac{r}{r_1 \cdot r_2} \cdot \cos \psi}, \quad (2)$$

2) для ГРМ:

$$РГМ = m \frac{E_{m2}}{E_{m1}} \cdot \frac{F_2(\alpha; \beta) \cdot \rho \cdot \frac{r}{r_1 \cdot r_2} \cdot \cos \psi}{1 + F_1(\alpha; \beta) \cdot \rho \cdot \cos \psi}, \quad (3)$$

где ρ – модуль коэффициента отражения.

РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Предлагаемая методика и алгоритм её применения

Напряжённость поля отражённого сигнала зависит от свойств объекта, которые характеризуются геометрическими размерами и коэффициентом отражения. Различные виды переизлучателей характеризуются сво-

им модулем отражения ρ , поэтому они по-разному формируют отражённый сигнал и влияют на общую картину переотражений. Величина искривлений пропорциональна коэффициенту отражения $k_{отр} = \rho \times r / (r_1 + r_2)$, который будет тем больше, чем больше площадь отражателя и величина $r / (r_1 + r_2)$.

В простейшем случае объекты могут быть аппроксимированы такими моделями, как стенка (имитирует отражения от зданий, мостов, заборов), цилиндр (имитирует отражения от заводских труб, цистерн, ёмкостей, фюзеляжей ВС) и полусферический диффузный отражатель (имитирует отражение от возвышенностей рельефа). Как правило, в зоне облучения КРМ или ГРМ находятся несколько разнотипных объектов. Общее искажение представляет собой сумму искажений от совокупности элементарных отражателей [4].

Для оценки отражающих свойств объектов целесообразно определить их эффективную площадь рассеяния (ЭПР). Величина ЭПР отражающего объекта определяется: формой (размерами) объекта, используемыми материалами (отражающие, поглощающие, радиопрозрачные), технологией производства (гладкость внешней поверхности, наличие ступенек, вырезов, щелей). В общем виде ЭПР определяется как [9]:

$$\sigma = 4\pi \lim_{R \rightarrow \infty} R^2 \frac{E_s^2}{E_0^2}, \quad (4)$$

где E_0 – величина электрической составляющей, падающей от источника на объект электромагнитного поля;

E_s – величина электрической составляющей рассеянного (scattered) электромагнитного поля в точке приёма;

R – расстояние от объекта до излучающего средства.

Наибольший вклад в ЭПР вносят площадь и форма отражающего объекта. Различают объекты простых форм и сложных форм.

Рассмотрим методы для расчёта ЭПР отражателей простых форм (табл. 1), которые могут быть применены в том числе для предварительной оценки [9].

В настоящее время на аэродромах могут встречаться объекты из радиопрозрачных материалов (например, ангары или фюзеляжи современных ВС, выполненные из композиционных материалов). Внутри этих объектов располагаются различные отражающие элементы (кабели, оборудование, металлические



Таблица 1

Методы оценки ЭПР отражателей простых форм

Отражатель	Геометрия	Формула	Примечание
Прямоугольная пластина		$\sigma = \frac{64\pi a^2 b^2}{\lambda^2}$ $\sigma = \frac{114a^6}{\lambda^4}$	При $\lambda \ll a$, $\lambda \ll b$ Для $\theta = 90^\circ$, $\varphi = 0^\circ$ При $a=b$, $\lambda \gg a$ Для $\theta = 90^\circ$, $\varphi = 0^\circ$
Цилиндр		ЭПР круглого цилиндра: $\sigma = \frac{2\pi l^2 a}{\lambda}$ ЭПР эллиптического цилиндра: $\sigma = \frac{2\pi l^2 b^2}{\lambda a}$ ЭПР эллиптического цилиндра: $\sigma = \frac{2\pi l^2 a^2}{\lambda b}$	При $\lambda \ll l$, $\lambda \ll a$, $\lambda \ll b$ Для $\theta = 90^\circ$, $\varphi = 0^\circ$ Для $\theta = 90^\circ$, $\varphi = 90^\circ$
Конус-цилиндр		$\frac{\sigma}{\pi \cdot a^2} = \frac{4\pi}{(\pi + \alpha)^2} \times \sin^2\left(\frac{\pi^2}{\pi + \alpha}\right) \times \frac{1}{\left[\cos\left(\frac{\pi^2}{\pi + \alpha}\right) - \cos\left(\frac{2\pi^2}{\pi + \alpha}\right)\right]^2}$	Для $\theta = \varphi = 0^\circ$ Размеры отражателя больше длины волны

элементы конструкции – для ВС; несущие конструкции в виде металлических ферм – для ангаров). Поэтому актуальным является расчёт характеристик рассеяния таких сложных объектов.

Внутренние металлические конструкции сложных объектов могут быть представлены в виде идеально проводящих элементов, как это показано на рис. 4 [10].

Целесообразно также применять комбинированный способ моделирования, учитывая диэлектрические (радиопрозрачные) и идеально проводящие элементы сложного объекта. Идеально проводящие рассеивающие элементы можно разбить на две группы [10–12]: гладкие поверхности (аппроксимируются участками трехосных эллипсоидов) и кромочные локальные участки рассеяния (аппроксимируются линиями излома).

Линия излома поверхности (участок плоской кривой) аппроксимируется участком эллипса, а ребро прямолинейного излома – отрезком прямой. Количество эллипсоидов для каждого сложного объекта выбирается индивидуально. Пусть сложный объект облучается плоской волной [10–12]:

$$\begin{aligned} \vec{E}^0(\vec{x}) &= \vec{p} e^{jk_0(\vec{R}^0 \cdot \vec{x})}; \\ \vec{H}^0(\vec{x}) &= \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \left(\vec{R}^0 \times \vec{p} \right) e^{jk_0(\vec{R}^0 \cdot \vec{x})}, \end{aligned} \tag{5}$$

где $\vec{p}^0$ – орт поляризации радиоволны;
 $\vec{R}^0$ – орт направления распространения радиоволны;
 ϵ_0, μ_0 – абсолютные диэлектрическая и магнитная проницаемости свободного пространства;

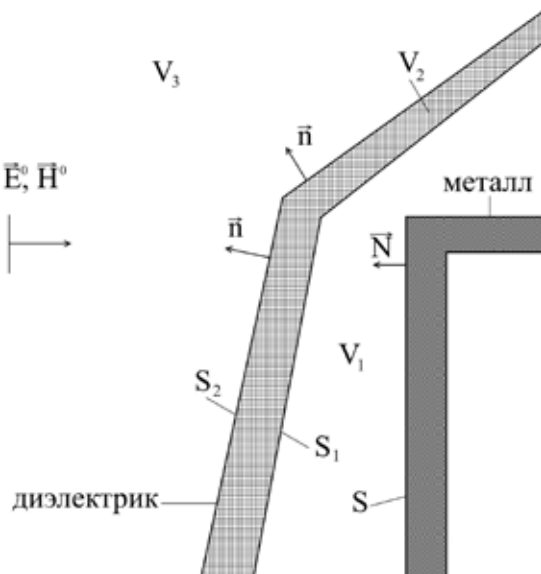


Рис. 4. Модель сложного объекта (на примере ангара).

k_0 – волновое число в свободном пространстве ($k_0 = 2\pi / \lambda$, λ – длина падающей монохроматической волны);

$\vec{x}$ – радиус-вектор текущей анализируемой точки.

Поле вспомогательного точечного источника излучения (диполя) в присутствии лишь области V_2 (внешняя диэлектрическая оболочка) определяется как $\vec{\xi}(\vec{x} | \vec{x}_0, \vec{p})$ и $\vec{N}(\vec{x} | \vec{x}_0, \vec{p})$, где $\vec{x}_0$ – точка расположения источника излучения, $\vec{p}$ – его вектор-момент.

Для получения рассеянного поля от рассматриваемого сложного объекта применим выражение [10–12]:

$$\vec{p} \cdot \vec{E}^p(-\vec{R}^0) = \vec{p} \cdot \vec{\xi}(-\vec{R}^0) + \frac{1}{j\omega_s} \int_S \vec{I}(\vec{x}) \cdot \vec{\xi}(\vec{x} | \vec{R}^0, \vec{p}) dS, \quad (6)$$

где $\vec{\xi}(-\vec{R}^0)$ – поле, рассеянное только внешней диэлектрической оболочкой в отсутствие идеально проводящих элементов под ней;

$\vec{\xi}(\vec{x} | \vec{R}^0, \vec{p})$ – тангенциальная составляющая поля плоской волны (по отношению к поверхности идеально проводящих элементов S), распространяющейся в направлении $\vec{R}^0$ и прошедшей через диэлектрическую оболочку, в точке x на поверхности идеально проводящих элементов S ;

$\vec{I}(\vec{x})$ – плотность поверхностного тока на S , наведённая прошедшей сквозь диэлектрическую оболочку плоской волной $(\vec{E}^0, \vec{H}^0)$;

$\vec{p}$ – орт направления поляризации плоской волны.

Интегральный член в данном выражении даёт вклад идеально проводящих элементов (под диэлектрической оболочкой) в общее поле рассеяния, с учётом внутрисистемных электродинамических взаимодействий. Учитывая, что сложный объект как правило имеет большие электрические размеры, слагаемые правой части могут быть вычислены приближённо, с помощью метода коротковолновой дифракции. Подробнее метод определения поля, отражённого от сложных объектов, описан в [10–12].

После проведения расчётов искривлений линии курса и глиссады необходимо обработать результаты. Амплитуду искривлений линии глиссады целесообразно анализировать от границы зоны действия ГРМ, на удалении 18,5 км от торца ВПП, а амплитуду искривлений линии курса – примерно от границы зоны действия широкого канала КРМ, удалённой на 32 км от радиомаяка. На анализируемом участке необходимо определить интервалы, на которых амплитуда искривлений превосходит максимально допустимое значение, и просуммировать их. Если общая протяжённость этих участков превысит 5 % от длины анализируемого интервала, значит требования по точности данного канала не выполняются.

Полностью устранить влияние переизлучённых сигналов на работу системы ILS не-





Рис. 5. Спутниковый снимок ВПП аэродрома Горно-Алтайск с указанием критических зон КРМ и ГРМ, а также отражателей (холм и здания).

возможно, поэтому ИКАО введены ограничения на допустимую величину искривлений задаваемых траекторий, зависящую от расстояния до торца ВПП и категории системы посадки³.

Таким образом, применение предлагаемой методики сводится к следующему алгоритму:

1) Анализ существующей приаэродромной территории и выполнение оценки искривлений линий курса и глиссады при наличии зданий, сооружений и возвышенностей рельефа местности.

2) Сравнение результатов моделирования с данными лётных проверок РМС для проверки адекватности и точности применяемого метода в конкретных условиях.

3) Выполнение оценки влияния объектов, находящихся вблизи границ критических зон (определённых по ФАП-297), но не нарушающих её для подтверждения заданной категории ILS.

4) Выполнение оценки влияния объектов, находящихся внутри границ критических зон (определённых по ФАП-297). Размещение объектов может быть по границам зон, рекомендованных ИКАО, либо на требуемых рубежах, исходя из технологической необходимости.

5) По результатам моделирования необходимо сделать вывод о возможности сокращения размеров критической зоны радиомаяков ILS в соответствии с рекомендациями ИКАО.

При выполнении пунктов 3 и 4 необходимо провести моделирование для различных углов поворота объектов относительно антенной системы радиомаяка ILS. Последующую оценку и разработку решений следует проводить для наихудшего случая влияния объекта

на работу систем посадки (наибольшей величины искривлений линии курса или глиссады). Целесообразно результаты моделирования подтвердить при проведении лётных проверок.

2. Апробация разработанного алгоритма

Применим разработанный алгоритм для оценки возможности уменьшения размеров критических зон радиомаяков системы ILS на аэродроме Горно-Алтайск, расположенного в Республике Алтай. Аэродром имеет одну ВПП длиной 2031 м, оборудованную с одного направления радиомаячной системой посадки I категории, угол наклона глиссады $3^{\circ}20'$. На рис. 5 показан спутниковый снимок ВПП, с указанием размещения ГРМ и КРМ, объектов-переотражателей и критических зон КРМ и ГРМ (согласно ФАП-297).

Анализ района аэродрома (рис. 5) показал присутствие в створе ВПП холма, а также зданий вблизи самой ВПП, которые могут оказать влияние на работу КРМ. Критическая зона КРМ влияет на движение транспорта по РД и размещение ВС на местах стоянки.

В сборнике аэронавигационной информации (АИП)⁴ отмечено, что имеется ряд ограничений и особенностей при рулении ВС (рис. 6). Так, после посадки воздушных судов индекса 3–6 на ВПП 20, разворот на 180° разрешается выполнять на пониженной скорости только у порога ВПП 02, используя уширение. Руление по перрону вдоль занятых МС2 и МС3 разрешено ВС с размахом крыла не более 29 м. Руление по перрону вдоль занятых МС4–МС6 и МС10 разрешено ВС с размахом крыла не более 24 м. Также в АИП имеется ряд ограничений на заруливание/

³ Методические рекомендации по лётным проверкам наземных средств радиотехнического обеспечения полётов, авиационной электросвязи и систем светосигнального оборудования аэродромов. Приложение ИЛ № 79р. 2012 г.

⁴ АИР сборник аэронавигационной информации Российской Федерации. Часть III Аэродромы (AD). [Электронный ресурс]: <http://www.caiga.ru/common/AirInter/validaip/html/rus.htm>. Доступ 26.05.2023.

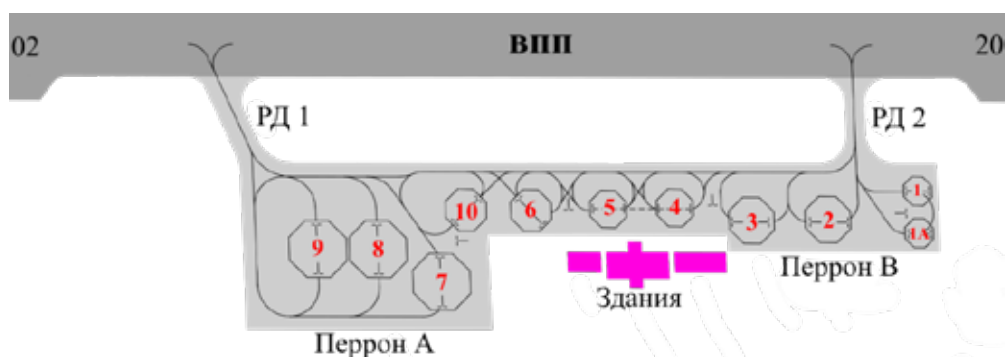


Рис. 6. Схема мест стоянок ВС аэродрома Горно-Алтайск.

Таблица 2

Продолжительность стоянки ВС на перроне

Группа ВС	Продолжительность стоянки ВС различных рейсов, ч			
	Транзитный	Обратный	Конечный	Начальный
I	1,50	2,10	0,90	0,90
II	1,00	1,20	0,80	0,90
III–IV	0,55	0,75	0,40	0,80

выруливание ВС с определённым размахом крыла (более 25–29 м) при занятых местах стоянки ВС со второй по шестую и десятую. Эти ограничения связаны с тем, что ширину перрона невозможно увеличить, не нарушив критическую зону КРМ.

В настоящей конфигурации при рулении даже средних (CRJ200) и малых (L410) ВС из одиннадцати имеющихся МС свободными должны быть от трёх до пяти, что повышает вероятность отказа P очередному ВС в обслуживании на перроне⁵:

$$P = \frac{\left(\frac{I_p}{2} T_n\right)^{N_n} \frac{1}{N_n!}}{\sum_{m=0}^{N_n} \left(\frac{I_p}{2} T_n\right)^m \frac{1}{m!}}, \quad (7)$$

где I_p – интенсивность движения ВС в расчётный час;

T_n – среднее время стоянки ВС на перроне;

N_n – число мест стоянки на перроне;

m – количество одновременно занятых стоянок.

Среднее время стоянки ВС на перроне может быть найдено из табл. 2. Для аэродрома Горно-Алтайск T_n принято равным 0,84 ч.

Уравнение (7) может решаться по каждой группе ВС, а также усреднённо по всем группам. Учитывая, что подавляющее число

взлетно-посадочных операций (ВПО) на аэродроме Горно-Алтайск выполняется ВС группы II–IV, получим минимальную вероятность отказа в обслуживании в диапазоне 0,0112...0,0126 (при интенсивности ВПО 10 ВС/ч) и 0,158...0,315 (при интенсивности ВПО 15 ВС/ч).

Ограничения на скорость руления оказывают влияние на время занятости ВПП. Так, при взлёте ВС время занятости $T_{взл}$ оценивается как:

$$T_{взл} = t_{вырул} + t_{ст} + t_{разб} + t_{нв}, \quad (8)$$

где $t_{вырул}$ – время выруливания на исполнительный старт;

$t_{ст}$ – время установки ВС на старте для доведения тяги двигателей до взлётной;

$t_{разб}$ – время разбега ВС;

$t_{нв}$ – время разгона и набора установленной высоты.

При посадке ВС время занятости $T_{пос}$ оценивается как:

$$T_{пос} = t_{пл} + t_{проб} + t_{отрул}, \quad (9)$$

где $t_{пл}$ – время планирования ВС с высоты принятия решения до касания ВПП;

$t_{проб}$ – время пробега ВС;

$t_{отрул}$ – время отруливания ВС за боковую границу ВПП (за пределы критической зоны КРМ).

Для проведения оценочного расчёта примем типовые значения указанных временных интервалов, характерных для аэродрома Горно-Алтайск (табл. 3). Значения вырулива-

⁵ Глушков Г.И., Бабков В.Ф., Тригопи В.Е. и др. Изыскания и проектирование аэродрома: Учеб. для вузов / Под ред. Г. И. Глушкова. 2-е изд. – М.: Транспорт, 1992. – 463 с.



Таблица 3

Значения временных интервалов для оценки занятости ВПП

Временной интервал	Значение, с
Время выруливания ВС на исполнительный старт $t_{\text{вырул}}$	30...60
Время установки ВС на старте для доведения тяги двигателей до взлетной $t_{\text{ст}}$	30...60
Время разбега ВС $t_{\text{разб}}$	10...20
Время разгона и набора установленной высоты $t_{\text{наб}}$	10...25
Время планирования ВС с высоты принятия решения до касания ВПП $t_{\text{пл}}$	15...30
Время пробега ВС $t_{\text{проб}}$	15...25
Время отруливания ВС за боковую границу ВПП (за пределы критической зоны КРМ) $t_{\text{отрул}}$	30...60

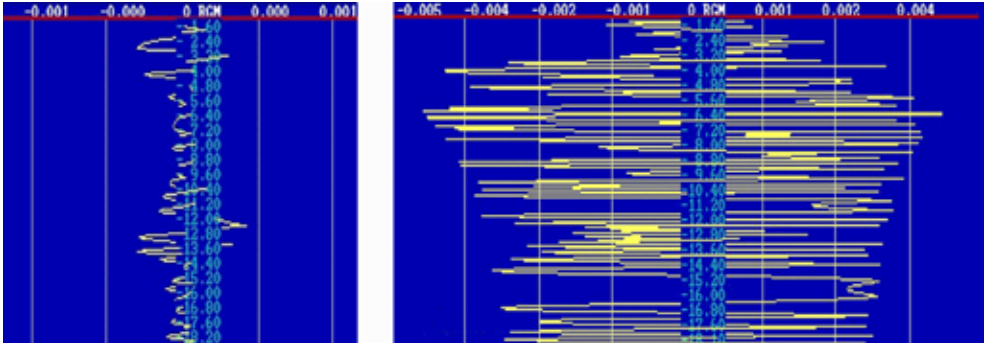


Рис. 7. Искривления линий курса и глиссады системы ILS аэродрома Горно-Алтайск для существующей приаэродромной территории.



Рис. 8. Размещение ВС с размерами, соответствующими Boeing-737, вблизи границы критической зоны КРМ.

ния и отруливания приняты согласно условию снижения скорости и возможного ожидания при занятии МС, указанных в АИП.

Таким образом, время занятия ВПП составит 80...165 с при взлёте и 60...115 с при посадке. Эти временные интервалы могут быть сокращены путём уменьшения времени выруливания и отруливания. Для решения этой задачи необходимо расширить перрон, что позволит не уменьшать скорость при рулении и занимать места стоянки со второй по шестую и десятую без риска блокирования пути следующим ВС. Это решение требует сокращения критической зоны КРМ, поэтому целесообразно провести оценку возможности и целесообразности данного решения и возможного влияния объектов на работу системы ILS.

Воспользуемся разработанным алгоритмом, включающим 5 этапов.

1. Выполним оценку искривлений линий курса и глиссады для существующей приаэродромной территории с применением (5) и (6). Здания и сооружения (рис. 6) представляют собой объекты простой формы, которые могут быть аппроксимированы моделью переотражателя в виде стенки, возвышенности рельефа местности аппроксимируем моделью полусферического диффузного отражателя. Результаты анализа представим в виде графиков искривлений линий курса и глиссады, выраженных в единицах РГМ (рис. 7).

2. Полученные результаты позволяют сделать вывод о выполнении требований категории I, что подтверждает результаты лётной проверки. Таким образом, применяемая

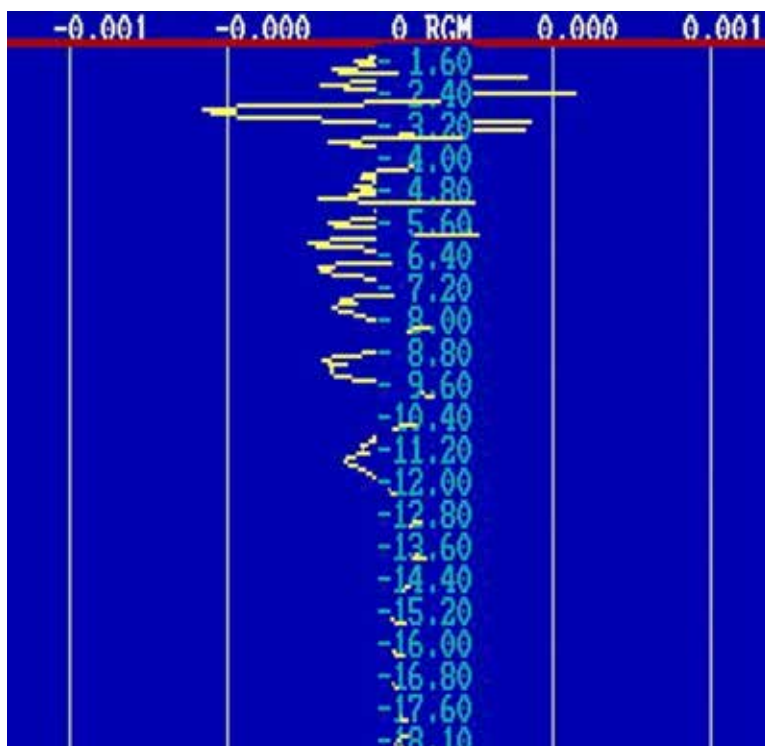


Рис. 9. Искривления линии курса системы ILS аэродрома Горно-Алтайск при нахождении Boeing-737, вблизи границы критической зоны КРМ.



Рис. 10. Вариант расширенного перрона аэродрома Горно-Алтайск (указаны новая критическая зона КРМ и места размещения исследуемых объектов).

методика даёт адекватную оценку для условий аэродрома Горно-Алтайск.

3. Выполним оценку искривлений линии курса при нахождении ВС с размерами, соответствующими Boeing-737, вблизи границы критической зоны КРМ (рис. 8). Результаты анализа представлены на рис. 9. Видно, что

искривления не выходят за рамки требований категории I, таким образом, крупные объекты-отражатели не вызывают существенных искажений линии курса, что подтверждает адекватность введённых критических зон, размеры которых соответствуют требованиям ФАП-297.



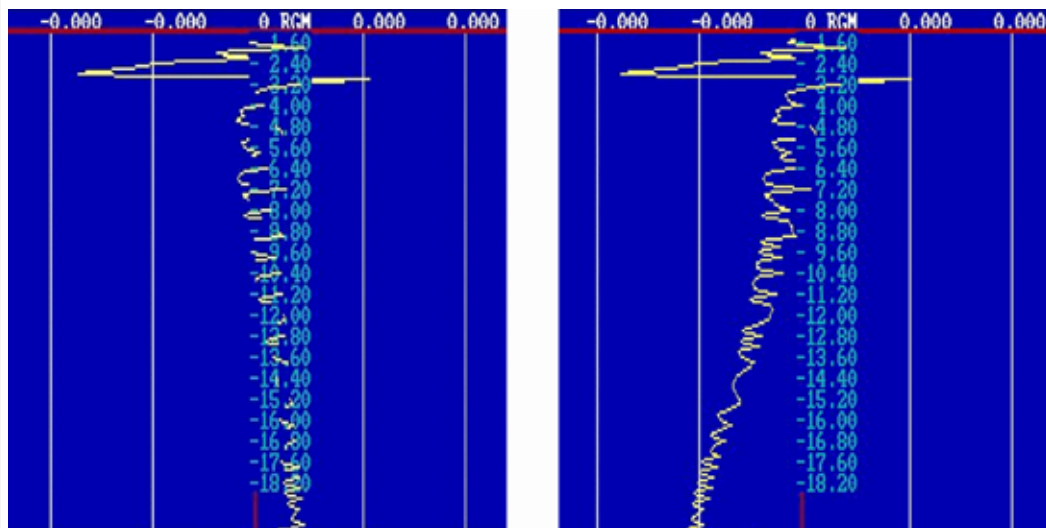


Рис. 11. Искривления линии курса, вызванные аэродромной техникой (модели автомобиля и трактора).

4. Выполним оценку влияния объектов для сокращённой критической зоны КРМ. Сокращение границ критической зоны КРМ вызвано необходимостью расширения перрона. На рис. 10 показан возможный вариант нового перрона (ширина увеличена на 35 м), а также границы новой критической зоны КРМ (расстояние от оси ВПП сократилось до 80 м) и места расположения объектов. Это позволит оптимизировать процедуры руления, а также даст возможность модернизировать места стоянки для приёма тяжёлых ВС.

Выполним оценку искривлений линии курса для следующих объектов:

- аэродромной техники (модели автомобиля и трактора);
- для лёгких самолётов (L410);
- для средних самолётов (CRJ200);
- для тяжёлых самолётов (Boeing-737).

На аэродроме Горно-Алтайск отсутствуют объекты, требующие применения методов оценки ЭПР переотражателей различных форм, приведённые в табл. 1. Также отсутствуют сооружения, требующие применения модели сложного объекта (рис. 4). Поэтому, в данном примере, применён упрощённый расчёт: техника аппроксимирована моделью вертикальной стенки, а ВС – моделью горизонтального цилиндра (фюзеляж) и вертикальной стенки (хвост). Для более точного расчёта рекомендуется учитывать сложную форму объектов, а также их структуру. Результаты моделирования представлены на рис. 11 и 12.

5. Результаты моделирования (рис. 11 и 12) показывают, что при размещении объектов (аэродромной техники и воздушных судов различных классов) на позициях, показанных на рис. 10, искривления линии курса не превышают нормативных значений для категории I. Можно сделать вывод о возможности сокращения размеров критической зоны КРМ в соответствии с рекомендациями ИКАО.

ОБСУЖДЕНИЕ

В дальнейших исследованиях планируется провести доработку представленной методики, включив в анализ ранее не учтённые факторы, что позволит повысить точность и достоверность результатов. При этом следует принимать во внимание математическую сложность модернизируемой методики, а также возможность её реализации в виде программного пакета.

Рассмотрим некоторые аналоги. В настоящее время разработаны и реализованы методы оценки и учёта искривлений линий курса и глиссады системы ILS. Так, компания Airbus, совместно с французской Национальной школой гражданской авиации (Ecole Nationale de l'Aviation Civile, ENAC) и Европейским аэрокосмическим и оборонным концерном (European Aeronautic Defence and Space Company, EADS) разработала программные продукты: ATOLL и LAGON, позволяющие моделировать влияние рельефа местности и местных объектов на работу системы ILS методом физической оптики [1].

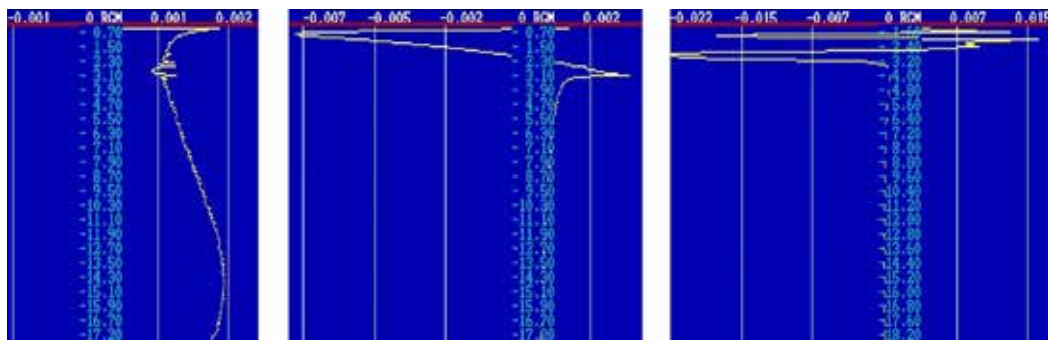


Рис. 12. Искривления линии курса, вызванные легкими, средними и тяжелыми самолетами.

В работе [7] программа ATOLL применялась для оценки влияния планируемого здания и строительных кранов (с различными углами поворота стрелы) на работу КРМ аэродрома Рига. Методом моделирования было доказано, что новое здание позволит сохранить имеющуюся категорию посадки, однако при строительстве необходимо выбирать точки размещения строительных кранов и отслеживать угол поворота их стрел при заходе ВС на посадку, так как это может привести к недопустимым искривлениям линии курса.

Также ведутся работы по применению метода моментов и многоуровневого мультипольного метода. При этом, в [1] отмечается, что данные методы имеют ряд ограничений, в частности, не способны учесть влияние подстилающей поверхности в виде уступа. В целом, учёт подстилающей поверхности (уклон в продольном и поперечном направлениях, неровности микрорельефа, наличие снежного или травяного покрова и его неоднородность) является отдельным направлением исследований [13–15] и в будущем должен будет применяться в перспективных методиках оценки искривлений линии курса и глиссады системы ILS.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В связи с совершенствованием характеристик систем ILS размеры критических зон радиомаяков (регламентируемые в ФАП-297) могут быть сокращены. В документах ИКАО представлены рекомендуемые размеры критических зон, при этом отмечено, что предпочтительно проводить моделирование влияния объектов на работу КРМ и ГРМ.

В статье представлена методика оценки искривлений линий курса и глиссады и раз-

работан алгоритм её применения. На примере аэродрома Горно-Алтайск выполнена оценка влияния объектов, находящихся в пределах существующей критической зоны на работу КРМ. Было доказано, что критическая зона КРМ может быть сокращена, что даст возможность расширить перрон на 35 м и устранить имеющуюся на сегодняшний день проблему с ограничением скорости руления и блокированием движения ВС с размахом крыльев более 25...29 м при занятии мест стоянки ВС со второй по шестую и десятую.

При расширении перрона удастся получить вероятность отказа в обслуживании в диапазоне 0,001...0,003 (при интенсивности ВПО 10 ВС/ч) и 0,05...0,105 (при интенсивности ВПО 15 ВС/ч), что в 3...11 раз меньше существующей вероятности.

Расширение перрона позволит не снижать скорость руления и устранить ожидание ВС при занятых местах стоянки со второго по шестое и десятое. Таким образом, уменьшится время выруливания и отруливания примерно до 20...40 и 15...30 с. Это приведёт к уменьшению времени занятости ВПП до 70...145 с при взлёте и 45...85 с при посадке, что на 12,5...26 % лучше существующих показателей. Улучшение показателей (вероятность отказа в обслуживании и времени занятия ВПП) позволит увеличить пропускную способность аэродрома.

Поскольку ФАП-297 определяет фиксированные размеры критических зон КРМ и ГРМ, рекомендуется внести изменения в существующие нормативные акты для учёта рекомендаций ИКАО и обеспечения возможности сокращения критических зон радиомаяков системы ILS при условии сохранения заданного уровня безопасности полётов.





Необходимо определить случаи, требующие обязательного проведения лётной проверки новых критических зон и разработать программу специальных лётных проверок. Также необходимо определить случаи, допускающие установление границ критических зон на основании результатов моделирования и разработать единую методику и алгоритм проведения расчётов.

В дальнейших исследованиях планируется модернизировать методику оценки искривлений линий курса и глиссады для учёта дополнительных факторов, в том числе характеристик подстилающей поверхности, влияющих на пространственные характеристики излучения радиомаяков.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Войтович Н. И., Ершов А. В., Юнгайтис Е. М. Дифракция электромагнитных волн на полуплоскости применительно к системе посадки воздушных судов на аэродромы с высоким уровнем снежного покрова и сложным рельефом местности в зоне захода на посадку // Вестник УрФО. Безопасность в информационной сфере. – 2022. – № 1 (43). – С. 11–21. DOI: 10.14529/secur220102.
2. Tong, Kuang; Song, Yang; Kong, Xiangfen; Zhang, Kaiwen; Chen, Zijian. An integrated method for accurate identification and dynamic monitoring of buildings in aerodrome obstacle free space. ICAS 2020, pp. 1–14. [Электронный ресурс]: https://icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2020/data/papers/ICAS2020_1061_paper.pdf. Доступ 17.06.2023.
3. Mitsevich, L., Zhukovaskaya, N. Geospatial modeling, analysis and mapping for aerodrome land. E3S Web of Conferences, 2021, Vol. 310, EDP Sciences, pp. 1–10. DOI: 10.1051/e3sconf/202131004003.
4. Рубцов Е. А. Автоматизация оценки влияния объектов строительства на работу средств радиотехнического обеспечения полётов // I-methods. – 2022. – Т. 14. – № 3. [Электронный ресурс]: <http://intech-spb.com/wp-content/uploads/archive/2022/3/4-rubcov.pdf>. Доступ 17.06.2023.
5. Юнгайтис Е. М., Ершов А. В., Жданов Б. В., Войтович Н. И. Искривления радиотехнической глиссады как голографический портрет рельефа местности // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'2019). – Севастополь, 2019. – С. 43–48. EDN: SRRJJO.
6. Iungaitis, E. M., Ershov, A. V., Zhdanov B. V., Voytovich, N. I., Zotov, A. ILS Glide Slope Antenna Array for Airfields with a High Level of Snow Cover. 13th European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP 2019.

- Krakow, 2019, 8740267. [Электронный ресурс]: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8740267>. Доступ 17.06.2023.
7. Vorontsov, K., Lacane, M. A. Case Study for Riga International Airport Modernization: ILS Localizer Signal Accuracy Depending on Ground Obstacles Located Nearby. International Conference on Reliability and Statistics in Transportation and Communication. Springer, Cham, 2020, pp. 235–245. DOI:10.1007/978-3-030-68476-1.
 8. Zotov, A. V., Zhdanov, B. V., Voytovich, N. I. Theory and experiment of ILS localizer course line electronic adjustment. 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2019. Sochi, 2019, 8743091. DOI: 10.1109/ICIEAM.2019.8743091.
 9. Вожаев В. В., Теперин Л. Л. Характеристики радиолокационной заметности летательных аппаратов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2018. – 376 с. ISBN 978-5-9221-1782-1.
 10. Ряполов И. Е., Василец В. А., Сухаревский О. И., Ткачук К. И. Высокочастотный метод расчёта вторичного излучения модели фюзеляжа беспилотного летательного аппарата // Системы озброєння і військова техніка. – 2014. – № 1 (37). – С. 222–225. [Электронный ресурс]: https://www.researchgate.net/publication/370806235_VYSOKOCASTOTNYJ_METOD_RASCETA_VTORICNOGO_IZLUCENIA_MODELI_FUZELAZA_BESPILOTNOGO_LETATELNOGO_APPARATA. Доступ 17.06.2023.
 11. Сухаревский О. И., Василец В. А., Кукобко С. В. [и др.]. Рассеяние электромагнитных волн воздушными и наземными радиолокационными объектами: Монография / под ред. О. И. Сухаревского. – Х.: ХУПС, 2009. – 468 с. ISBN 978-9-6646-8040-7.
 12. Nechitaylo, S. V., Orlenko, V. M., Sukharevsky, O. I., Vasilets, V. A. Electromagnetic Wave Scattering by Aerial and Ground Radar Objects, SRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton, USA, 2014, 334 p. ISBN 9781315214511.
 13. Зотов А. В. Исследование влияния рельефа местности на выходные характеристики курсового радиомаяка системы инструментальной посадки самолётов / Автореф. дисс. канд. техн. наук. – Екатеринбург, 2017. – 22 с. [Электронный ресурс]: <https://dspace.susu.ru/xmlui/bitstream/handle/0001.74/13585/00055376.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Доступ 17.06.2023.
 14. Юнгайтис Е. М., Войтович Н. И., Головин А. А., Жданов Б. В. Влияние рельефа местности в виде уступа на поведение траектории для захода самолёта на посадку // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'2017): Материалы 27-й Международной Крымской конференции. В 9-ти томах, Севастополь, 10–16 сентября 2017 года. Том 2. – Севастополь: Севастопольский государственный университет, 2017. – С. 379–386. EDN: YNKSNY.
 15. Юнгайтис Е. М., Жданов Б. В., Ершов А. В., Войтович Н. И. Поведение информационного параметра глиссадного радиомаяка системы посадки самолётов // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. – 2020. – № 1–2. – С. 74–75. EDN: IDPLUN.

Информация об авторах:

Рубцов Евгений Андреевич – кандидат технических наук, заместитель директора Академии гражданской авиации Российского университета транспорта, Москва, Россия, rubtsov.rut.miit@yandex.ru.

Кудряков Сергей Алексеевич – доктор технических наук, старший научный сотрудник, директор Научно-образовательного центра воздушного транспорта Российского университета транспорта, Москва, Россия, psi_center@mail.ru.

Далингер Яков Михайлович – кандидат технических наук, проректор Российского университета транспорта, Москва, Россия, iakovdaliniger@gmail.com.

Статья поступила в редакцию 29.05.2023, одобрена после рецензирования 01.10.2023, принята к публикации 09.10.2023.