



# ПОВЕДЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННОГО ПАРАМЕТРА ГЛИССАДНОГО РАДИОМАЯКА СИСТЕМЫ ПОСАДКИ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ В ШИРОКОМ СЕКТОРЕ УГЛОВ МЕСТА

Статья посвящена проблеме защиты информации, формируемой глиссадным радиомаяком формата ПРМГ для обеспечения инструментального захода воздушных судов на посадку. Для обеспечения безопасного захода радиомаячная система посадки формирует в пространстве траекторию снижения – глиссаду. Целостность системы посадки призвана обеспечить развитая многоуровневая система контроля путём непрерывного контроля положения заданной глиссады и крутизны индицируемого параметра глиссады. Однако, при летных испытаниях глиссадного радиомаяка (ГРМ) иногда выявляют ложную глиссаду в зоне действия системы посадки, которая естественно нарушает ее целостность. В статье показана причина этого явления – нарушение кратности высот подвеса излучающих элементов антенной решётки ГРМ. Приведены данные летных измерений зоны глиссады на аэродроме в предгорной местности. Экспериментальные результаты подтверждают найденные теоретические закономерности в поведении информационного параметра глиссадного радиомаяка в широком секторе углов. Предложены рекомендации для сохранения целостности системы посадки.

**Ключевые слова:** ГРМ, целостность, информационный параметр ГРМ, угол глиссады, ложная глиссада.

# BEHAVIOR OF THE INFORMATION PARAMETER OF THE GLIDE PATH BEACON OF THE LANDING SYSTEM IN A WIDE SECTOR OF ANGLES

*The article is devoted to the problem of information protection generated by a glide path beacon of the PRMG format for providing instrumental approach of aircraft for landing. To ensure a safe approach, the radio beacon landing system forms a descent trajectory in space - a glide path. A developed multilevel control system is designed to ensure the integrity of the landing system by continuous monitoring of the position of a given glide path and the steepness of the indicated glide path parameter. However, during flight tests of a glide path beacon (GPB), a false glide path is sometimes detected in the area of the landing system, which naturally violates its integrity. The article shows the reason for this phenomenon - a violation of the multiplicity of the heights of the suspension of the radiating elements of the GPB antenna array. Flight measurements data of the glide path zone at the airfield in the foothills are given. The experimental results confirm the theoretically found regularities in the behavior of the information parameter of the glide path beacon in a wide sector of angles. Recommendations are proposed for maintaining the integrity of the landing system*

**Keywords:** *Glide Path Beacon, integrity, Glide Path Beacon information parameter, glide path angle, false glide path.*

Статистика аварий, поломок самолетов и катастроф в авиации говорит о том, что около 60% авиационных происшествий происходит при заходе на посадку и посадке самолета [1]. Причиной авиационных происшествий может быть человеческий фактор, неблагоприятные погодные условия или технические проблемы с самолетом либо проблемы с информацией, формируемой радиомаячной системой посадки. Пилоту принять правильное решение в нештатной ситуации, когда, что-то пошло не так - чрезвычайно сложно, у него стрессовое состояние, дефицит времени и ограниченная показаниями бортового оборудования информация.

На тридцать третьей Ассамблеи ИКАО была названа главная причина всех авиационных происшествий при заходе на посадку и посадке: «Неспособность распознать экипажем воздушного судна необходимости ухода на второй круг и невыполнение этого маневра».

Естественно стремление разработчиков [2] и персонала, эксплуатирующего радиомаячные системы посадки воздушных судов, обеспечить пилота или автопилот безопасной информацией о траектории захода на посадку.

В глиссидных радиомаяках «нулевой зоны» [3, 4] применена двухэлементная антенная решетка излучающих элементов (антенн), разнесенных по высоте. В настоящей статье представлен анализ влияния ошибки в установке нижней антенны на поведение зоны глиссады. Анализ предшествует подробное изложение принципа работы глиссидного радиомаяка формата ПРМГ [3, 4]. Это сделано потому, что в известных литературных источниках и методической литературе [5-8] нет такого материала. Вначале выполнен анализ параметров ГРМ, как это обычно делается, в предположении идеальной проводимости подстилающей поверхности. Предположение идеальной проводимости позволя-

ет оперировать простыми соотношениями, которые, тем не менее, дают высокую точность в расчете основных параметров ГРМ в реальной ситуации.

Затем, выполнен анализ с учетом того, что подстилающая поверхность представляет собой границу раздела двух сред: воздух-почва. Предположено, что в случае реальной подстилающей поверхности (во втором случае) нижняя антенна ГРМ смещена относительно номинальной высоты вверх на величину, равную длине волны. Исследовано поведение зоны в этом случае. Приведены данные летных измерений зоны глассады на аэродроме в предгорной местности. Эксперименталь-

ходом, подстроечный фазовращатель, первую и вторую антенны. Выходы первого и второго генераторов прямоугольных колебаний соединены с сигнальными входами переключателя. Выход третьего генератора прямоугольных колебаний соединен с параллельно включенными управляющим входом переключателя и с управляющим входом дискретного управляемого фазовращателя. Первый выход регулируемого делителя последовательно соединен с подстроечным фазовращателем и первой (нижней) антенной. Второй выход соединен с дискретным управляемым фазовращателем, выход которого соединен со второй антенной.

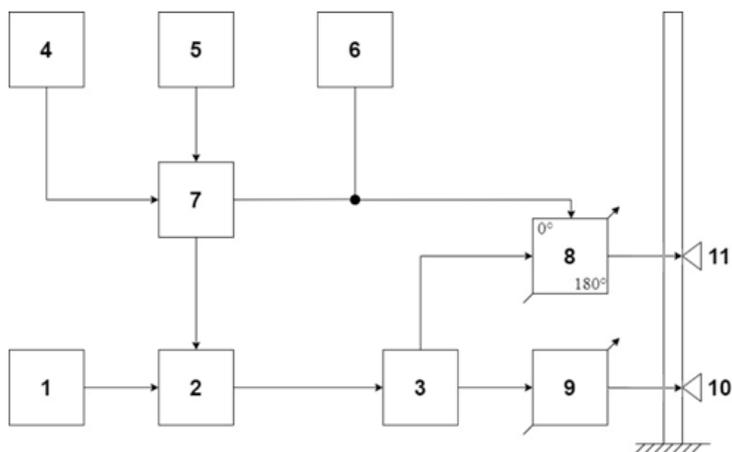


Рис.1. Структурная схема глассадного радиомаяка формата ПРМГ

1 – генератор высокочастотных колебаний, 2 – ключ, 3 – регулируемый делитель мощности на два направления, 4 – первый генератор прямоугольных колебаний, 5 – второй генератор прямоугольных колебаний, 6 – третий генератор прямоугольных колебаний, 7 – переключатель, 8 – дискретный управляемый фазовращатель, 9 – подстроечный фазовращатель, 10 – первая антенна, 11 – вторая антенна

ные результаты подтверждают закономерности в поведении информационного параметра глассадного радиомаяка в широком секторе углов. В заключение дана рекомендация по установке нижней антенны.

### Принцип работы глассадного радиомаяка формата ПРМГ

Структурная схема ГРМ формата ПРМГ.

ГРМ (рис.1) содержит последовательно соединенные генератор высокочастотных колебаний, ключ и регулируемый делитель мощности на два направления, первый, второй и третий генераторы прямоугольных колебаний, переключатель с первым и вторым сигнальными входами, управляющим входом и выходом, дискретный управляемый фазовращатель с двумя фазовыми состояниями, отличающимися друг от друга на  $180^\circ$ , с сигнальным входом, управляющим входом и вы-

соты подвеса относительно поверхности Земли  $h_1$  и  $h_2$  первой и второй антенн равны  $h_1 = \frac{\lambda}{4 \sin \theta_{21}}$  и  $h_2 = \frac{\lambda}{2 \sin \theta_{21}}$ , где  $\lambda$  – длина волны,  $\theta_{21}$  – угол глассады. В результате излучения сигнала первой (второй) антенной в пространстве формируется диаграмма направленности  $F_1(\theta)$ ,  $(F_2(\theta))$ , (рис.2).

### Формирование навигационной информации

ГРМ работает следующим образом (рис.2). Гармонические колебания с несущей частотой  $\omega$  от высокочастотного генератора поступают на сигнальный вход первого ключа, на управляющий вход которого поступают две чередующиеся последовательности прямоугольных колебаний: с частотой 2100 Гц с выхода первого генератора прямоугольных колебаний и с частотой 1300 Гц с выхода

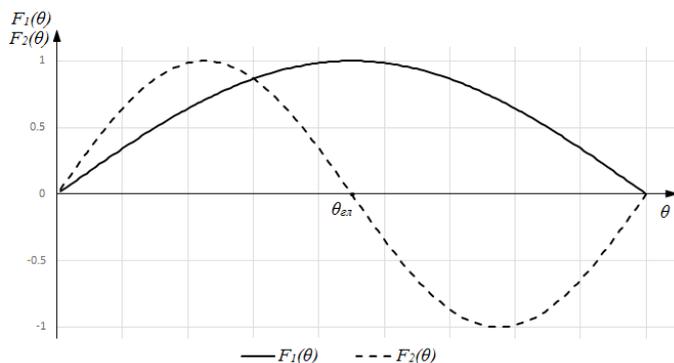


Рис.2. Амплитудные диаграммы направленности первой (нижней)  $F_1(\theta)$  и второй (верхней)  $F_2(\theta)$  антенн

второго генератора прямоугольных колебаний. Смена прохождения колебаний с частотами 2100 Гц и 1300 Гц осуществляется под управлением третьего генератора с частотой 12,5 Гц, сигналы которого одновременно поступают на управляющие входы переключателя и дискретного управляемого фазовращателя. В течение одного полупериода коммутации (в течение 0,04 сек.) через переключатель следует периодический сигнал прямоугольной формы, длительность импульса и длительность паузы которого в периоде равны друг другу («меандр»), с частотой 2100 Гц, а течение второго полупериода коммутации (в течение последующих 0,04 сек.) следует сигнал в форме «меандр» с частотой 1300 Гц.

гулируемого делителя сигнал поступает на дискретный управляемый фазовращатель, с выхода которого поступает на вторую антенну. С выхода генератора третьего генератора управляющие сигналы одновременно поступают и на переключатель, и на управляющий вход дискретного управляемого фазовращателя. Прохождение сигналов с частотой «меандра» 2100 Гц выполняется в течение одного полупериода колебания генератора с частотой 12,5 Гц. По окончании первого полупериода скачкообразно изменяется на половину длины волны электрическая длина пути дискретного управляемого фазовращателя для прохождения высокочастотного сигнала, модулированного с частотой «меандра» 1300 Гц.

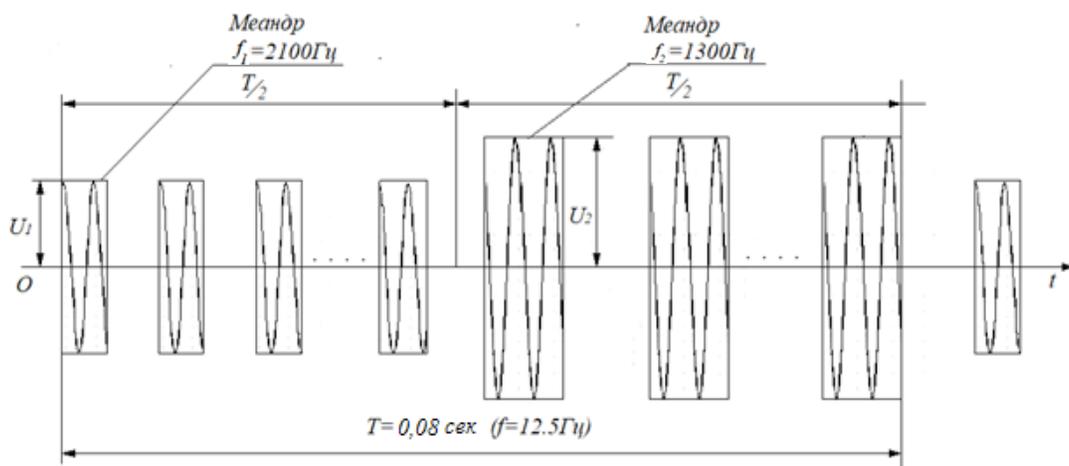


Рис. 3. Огибающая сигнала ПРМГ

Высокочастотный сигнал, модулированный последовательно сигналами в форме «меандр» с частотой 2100 Гц и 1300 Гц (рис.3), с выхода первого ключа поступает на вход регулируемого делителя. С первого выхода регулируемого делителя сигнал поступает через подстроечный фазовращатель на первую (нижнюю) антенну. Со второго выхода ре-

В каждый из полупериодов колебания с частотой 12,5 Гц высокочастотные колебания излучаются и первой и второй антеннами. В первом полупериоде обе антенны излучают синфазные высокочастотные сигналы, модулированные «меандром» с частотой 2100 Гц. В окружающем пространстве формируется амплитудная диаграмма направленности  $F_{2100}(\theta)$  (рис.4).

$$F_{2100}(\theta) = |\dot{F}_1(\theta) + a\dot{F}_2(\theta)| \quad (1)$$

где:  $a$  – соотношение амплитуд сигналов в первой и второй антеннах, устанавливаемое регулируемым делителем мощности.

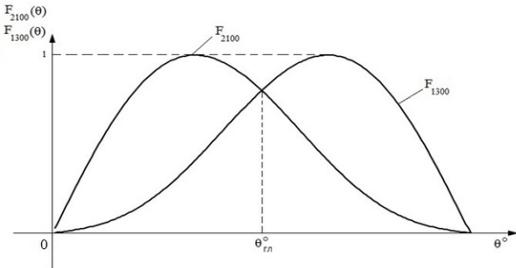


Рис.4. Амплитудные диаграммы направленности для сигналов 2100 Гц  $F_{2100}(\theta)$  и 1300 Гц  $F_{1300}(\theta)$

Во втором полупериоде излучаются сигналы, модулированные «меандром» с частотой 1300 Гц. При этом сигналы в первой и второй антеннах противофазны между собой. В результате в пространстве формируется амплитудная диаграмма направленности  $F_{1300}(\theta)$  (рис.4).

$$F_{1300}(\theta) = |\dot{F}_1(\theta) - a\dot{F}_2(\theta)| \quad (2)$$

Точка пересечения диаграмм направленности  $F_{2100}(\theta)$  и  $F_{1300}(\theta)$  определяет положение угла глissады  $\theta_{21}$ . При этом ниже угла глissады ( $\theta < \theta_{21}$ ) преобладает сигнал, модулированный «меандром» с частотой 2100 Гц. Выше угла глissады ( $\theta_{21} < \theta$ ) преобладает сигнал, модулированный «меандром» с частотой 1300 Гц.

### Теоретические исследования

Из соотношений (1) и (2), в частом случае идеальной проводимости подстилающей поверхности, следует, что угол глissады  $\theta_{21}$  равен углу места  $\theta$  при котором функция  $F_2(\theta)$  обращается в нуль  $F_2(\theta_{21}) = 0$ . При этом величина угла глissады  $\theta_{21}$  не зависит от поведения функции  $F_1(\theta)$ . Предпочтительно, чтобы функция  $F_1(\theta)$  при  $\theta = \theta_{21}$  принимала максимальное значение.

Воспользуемся далее соотношением, определяющим зону глissады  $KPC(\theta)$ , полагая, что ГРМ расположен над горизонтальной плоскостью. Тогда для вычисления  $KPC(\theta)$  воспользуемся соотношением (3).

$$KPC(\theta) = \frac{|\dot{E}_1(\theta) + a\dot{E}_2(\theta)| - |\dot{E}_1(\theta) - a\dot{E}_2(\theta)|}{|\dot{E}_1(\theta) + a\dot{E}_2(\theta)| + |\dot{E}_1(\theta) - a\dot{E}_2(\theta)|} \quad (3)$$

$$\dot{E}_1(\theta) = e^{ikh_1 \sin \theta} + R(\theta)e^{-ikh_1 \sin \theta} \quad (4)$$

$$\dot{E}_2(\theta) = e^{ikh_2 \sin \theta} + R(\theta)e^{-ikh_2 \sin \theta} \quad (5)$$

$h_1$  ( $h_2$ ) – высота подвеса нижней (верхней) антенны относительно подстилающей поверхности;

$$\dot{R}(\theta) = \frac{\sin \theta - \sqrt{\dot{\epsilon} - \cos^2 \theta}}{\sin \theta + \sqrt{\dot{\epsilon} - \cos^2 \theta}} \quad (6)$$

$\dot{R}(\theta)$  – коэффициент отражения Френеля от подстилающей поверхности  $\dot{\epsilon}$  – комплексная диэлектрическая проницаемость почвы.

### Подстилающая поверхность – идеальная проводящая плоскость

Рассмотрим вначале предельный случай, когда подстилающая поверхность представляет собой идеально проводящую плоскость. В этом случае коэффициент отражения  $\dot{R}(\theta)$  равен минус единице. Пусть высоты верхней и нижней антенн отличаются строго в 2 раза.

$$E_1(\theta) = 2\sin(\kappa h \sin \theta) \quad (7)$$

$$E_2(\theta) = 2\sin(2\kappa h \sin \theta) \quad (8)$$

Пусть  $h_2 = 2h_1 = 2h$ . Тогда

$$KPC(\theta) = 2a \cos(\kappa h \sin \theta) \quad (9)$$

Тогда при  $a \leq 0,5$  из (1):

Функция  $E_2(\theta)$  обращается в ноль при условии

$$2\kappa h \sin \theta_n = n\pi \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (10)$$

Угол глissады  $\theta_{21}$  соответствует  $n = 1$

$$\sin \theta_{21} = \frac{\lambda}{4h} \quad (11)$$

Найдем крутизну  $S$  зоны глissады (характеристики ГРМ) при  $\theta = \theta_{21}$ :

$$S = \frac{dKPC(\theta)}{d\theta} \Big|_{\theta = \theta_{21}} = -2a \sin(\kappa h \sin \theta_{21}) \cdot \kappa h \cos \theta_{21} = -2a \kappa h \cos \theta_{21} \quad (12)$$

Или, учитывая (11):

$$S = -a\pi \text{ctg} \theta_{21} \quad (13)$$

В соответствии с нормативными документами [9, 10, 11], границы полусектора зоны выше и ниже линии глissады должны устанавливаться относительно линии глissады в пределах:

- ниже линии глissады  $(0, 12 \pm 0,2) \theta_{21}$ ,
- выше линии глissады  $(0, 12_{-0,05}^{+0,02}) \theta_{21}$ .

Крутизна  $S$  ( $\frac{\%}{\text{град}}$ ) характеристики глissадного радиомаяка должна быть равна  $\frac{16,5\%}{K\theta_{21}}$ . Коэффициент  $K$  может принимать значение от 0,1 до 0,14 ниже линии глissады и от 0,07 до 0,14 выше линии глissады.

$$S(\theta) \Big|_{\theta = \theta_{21}} = \frac{0,165}{K\theta_{21}} \quad 0,1 \leq K \leq 0,14 \quad (14)$$

$$a \cdot \pi \cdot \text{ctg} \theta_{21} = \frac{0,165}{K\theta_{21}} \quad 0,1 \leq K \leq 0,14 \quad (15)$$

$$a \cdot \pi \cdot \text{ctg} \theta_{21} = \frac{0,165}{K\theta_{21}} \quad 0,1 \leq K \leq 0,14 \quad (16)$$

Учитывая то, что в радианной мере  $\theta_{2l} \ll 1$ , воспользуемся приближенным соотношением

$$\frac{\operatorname{tg} \theta_{2l}}{\theta_{2l}} \approx 1 \quad (17)$$

Тогда:

$$a = \frac{0,165}{K\pi} \quad 0,375 \leq a \leq 0,525 \quad (18)$$

При номинальном же значении коэффициента  $K = 0,12$  величина  $a = 0,44$ .

Далее будем полагать, что в ГРМ регулируемым делителем мощности установлен коэффициент  $a = 0,44$ .

Заметим, что при  $2h_1 = h_2 = h$  функция  $KPC(\theta) = a \frac{\sin(2kh \sin \theta)}{\sin(kh \sin \theta)}$  в точке  $\theta = 2\theta_{2l}$  имеет неопределенность вида  $\frac{0}{0}$ , которая в пределе раскрывается по правилу Лопиталья как величина. Функция  $KPC(\theta)$  непрерывна и при  $\theta = 2a_{2l}$  имеет максимальное значение, равное  $2a$ .

$\sigma_2$  – проводимость почвы.

Судя по графикам на рис.14 Рек. МСЭ-R P.527-4 19 в дециметровом диапазоне длин волн реальная часть  $\varepsilon'$  относительной диэлектрической проницаемости почвы в зависимости от ее влажности изменяется в пределах от 3 до 8. Судя по графикам на рис. 1.16 в [12] мнимая часть диэлектрической проницаемости для влажной почвы равна примерно 0,01, а для сухой – примерно 0,001. Поэтому мнимой частью диэлектрической проницаемости в сравнении с действительной в дециметровом диапазоне можно пренебречь.

Диэлектрическую проницаемость почвы будем полагать величиной вещественной (в пределах от 3 до 8)

### Поведение амплитудных и фазовых диаграмм направленности

На рис. 5 и рис. 6 приведены амплитудные и фазовые диаграммы направленности нижней и верхней антенн.

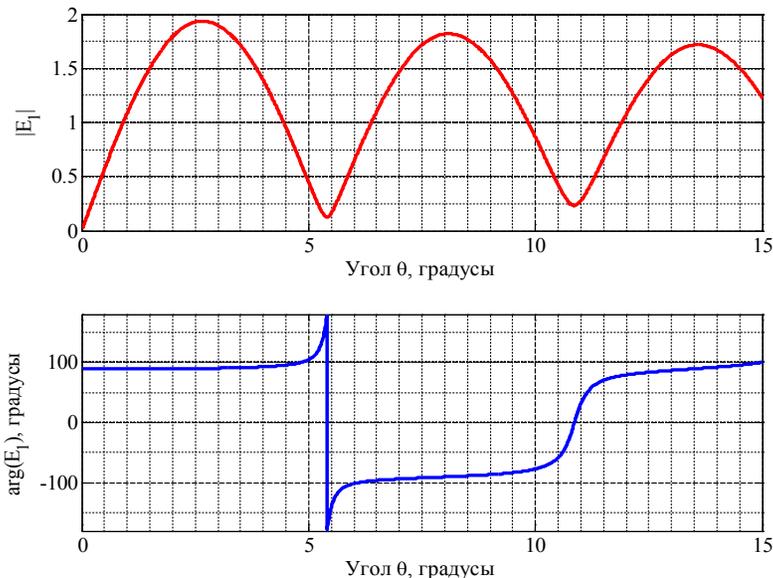


Рис. 5. Амплитудная и фазовая диаграммы направленности нижней антенны

### Подстилающая поверхность – граница двух диэлектриков

Параметры почвы в диапазоне дециметровых волн. В диапазоне дециметровых волн почву можно рассматривать как диэлектрик. Действительно,

$$\dot{\varepsilon} = \varepsilon' - i \frac{\sigma_2}{\omega \varepsilon_0}$$

$\varepsilon' = \frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_0}$  – относительная диэлектрическая проницаемость почвы,

$\varepsilon_a$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость среды,

$\varepsilon_0$  – электрическая постоянная вакуума,

Заметим, что фазовые диаграммы направленности в действительности представляют непрерывные монотонно растущие функции. С целью упрощения построения графиков зависимость фазы от угла места построена с точностью до  $360^\circ$ . Это упрощение придает графикам фазовых диаграмм направленности обманчивый вид – вид разрывных функций.

С учетом реальных свойств подстилающей поверхности коэффициент отражения Френеля отличен от минус единицы. Поэтому при углах места  $\theta_n$ , удовлетворяющих условию  $2khs \sin \theta_n = n\pi$   $n = 0, 1, 2, \dots$ , уровни в ми-

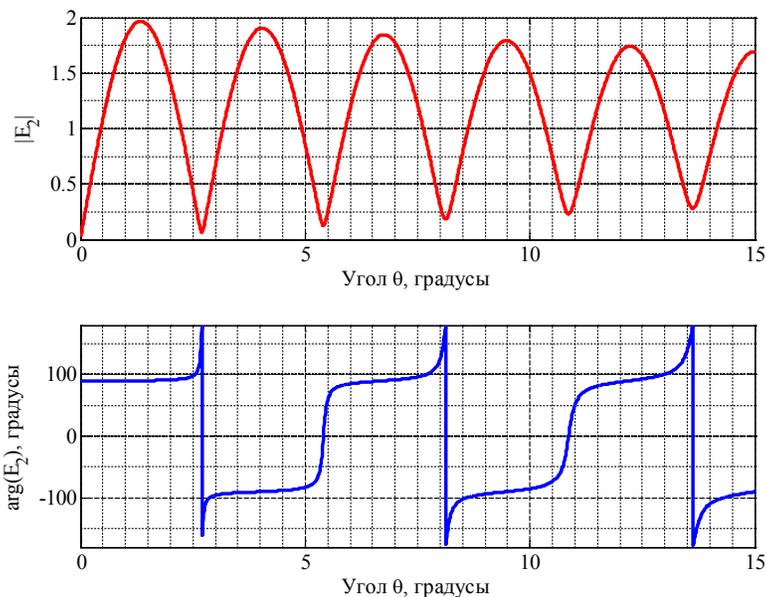


Рис. 6. Амплитудная и фазовая диаграммы направленности верхней антенны

нимумах диаграмм направленности имеют конечные значения. При этом в функции  $KPC(\theta)$  при  $0 < \theta_n$  исчезает неопределенность вида  $\frac{0}{0}$ .

На рис. 7 приведена зависимость  $KPC(\theta)$  в предположении, что относительная диэлектрическая проницаемость почвы равна 4.

Это область углов, в которой еще можно рассматривать экспериментальные записи токов на пленке шлейфного осциллографа при выполнении горизонтального полета, как обычно, на высоте 300 м в направлении оси ВПП.

Как видно из графиков на рис. 7, в случае идеально проводящей подстилающей по-

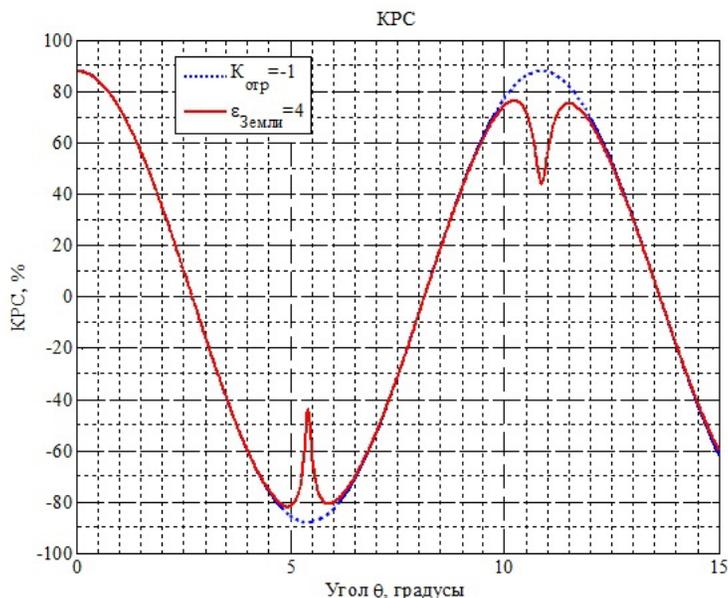


Рис. 7. Зависимость КРС от угла места

### Поведение КРС в зависимости от угла $\theta$ при $2h_1 = h_2$

С целью выявления общих закономерностей в поведении функции  $KPC(\theta)$  в зоне глissады и за ее пределами вычисления выполнены в диапазоне углов места  $\theta$ , превышающих угол глissады более чем в пять раз.

верхности функция представляет собой почти косинусоидальную зависимость. Более точно, осциллирующую зависимость, в которой угловые координаты точек с нулевыми уровнями, соотносятся как

$$\frac{\sin \theta_{n+1}}{\sin \theta_n} = \frac{n+1}{n} \quad n=1, 2, \dots \quad (19)$$

Или, учитывая при малых углах приближенное равенство  $\sin \theta_n \approx \theta_n$ , угловые координаты точек с нулевыми уровнями, соотносятся как

$$\frac{\theta_{n+1}}{\theta_n} = \frac{n+1}{n} \quad n=1, 2, \dots \quad (20)$$

т.е. как целые числа.

При учете параметров почвы как диэлектрика с относительной диэлектрической проницаемостью, равной 4, наблюдается различие в поведении функции  $KPC(\theta)$  в окрестности углов глissады, примерно равных  $2\theta_{2\lambda}$  и  $4\theta_{2\lambda}$ . В некоторой окрестности каждого из этих углов график функция  $KPC(\theta)$  выглядит как график кривой конического сечения с закруглением малого радиуса. В этих точках функция уклоняется от минимального значения, равного минус  $2a$ , при  $\theta \approx 2\theta_{2\lambda}$  и максимального значения, равного плюс  $2a$ , примерно на одну и ту же величину. Величина уклонения такова, что абсолютная величина в этих точках не менее, чем 41,5%.

Это означает, что если бортовой приемник способен работать при той напряженности поля, которая наблюдается в минимумах ДН нижней антенны, соответствующих рассматриваемым углам, то на экспериментальной записи токов индикации эти уклонения не будут отражаться.

### Поведение КРС в зависимости от угла $\theta$ при $2h_1 \neq h_2$

Предположим теперь, что требование установить соотношение высот равным 2:1 нарушено. Обратимся снова к (3).

Пусть, например, нижняя антенна установлена по высоте  $h_{1+\lambda}$  с ошибкой в одну длину волны  $h_{1+\lambda} = h_1 + \lambda$ . Тогда зависимость  $KPC$  от угла  $\theta$  примет вид, представленный на рис. 8. Вычисления выполнены для ГРМ с углом глissады  $\theta_{2\lambda} = 2,7^\circ$ .

На графике  $KPC(\theta)$  рис. 8 отмечены угловые координаты характерных точек зоны: угла глissады, полусекторов зоны ( $2,38^\circ$  и  $3,02^\circ$ ),  $KPC = 41,5\%$  ( $\theta = 1,77^\circ$ ) и  $KPC = -41,5\%$  ( $\theta = 3,36^\circ$ ). Угол глissады не изменился. Однако, поведение функции  $KPC(\theta)$  при  $h_{1+\lambda} = h_1 + \lambda$  резко отличается от поведения при соотношении высот, равным 2:1. В зоне действия ГРМ наблюдается ложная глissада под углом  $4,57^\circ$ . В верхней части сектора зоны  $KPC$  имеет положительный знак, недопустимый для этой части зоны. При ошибке в установке нижней антенны выше положенной высоты на одну длину волны (примерно 30 см) зона глissады не удовлетворяет требованиям, предъявляемым ГОСТ к зоне ГРМ второй категории (а также к ГРМ первой категории).

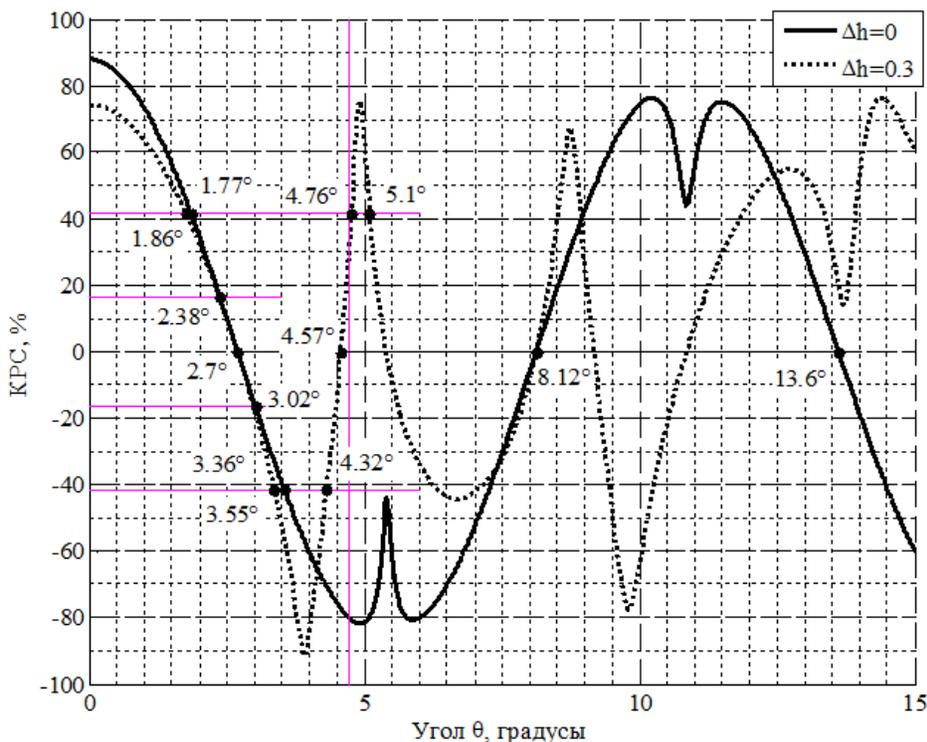


Рис. 8. Зависимость КРС от угла места при номинальной высоте подвеса нижней антенны и при смещенной вверх на одну длину волны

### Экспериментальные результаты

Экспериментальные результаты получены в переходный период от осени к зиме. В это время мерзлая земля в зоне, существенной для отражения электромагнитных волн, излучаемых ГРМ, была покрыта тонким слоем снега ( $\approx 5-8$  см). Измерения выполнены с помощью воздушного судна-лаборатории (ВСЛ), оборудованного аппаратурой летного контроля.

Принятые на борту воздушного судна высокочастотные сигналы ГРМ подвергаются преобразованию. Упрощенная схема блок-схема бортового приемника показана на рис. 9. Высокочастотные сигналы усиливаются в приемно-усилительном каскаде. Усиленные сигналы поступают на детектор. На выходе детектора тоновые сигналы выделяются полосовыми фильтрами и подвергаются выпрямлению. Разность и сумма выпрямленных тоновых токов формируют информационный сигнал: Коэффициент Разнослышимости Сигналов.

На рис. 10 приведена требуемая норма-

тивными документами зависимость информационного параметра от угла места  $KPC(\theta)$  и соответствующая ему величина тока индикации  $I(\theta)$ .

На рис. 10 по горизонтали откладывается нормированный угол места  $\frac{\theta}{\theta_{21}}$ . В качестве нормы выбран угол глиссады  $\theta_{21}$ . По вертикали откладывается величина  $KPC$  в процентах и ток индикации  $I$  в  $\mu A$ . Вертикальными прямыми указаны границы зоны действия ГРМ в вертикальной плоскости: нижняя граница, равная  $0,45\theta_{21}$  и верхняя граница, равная  $1,75\theta_{21}$ . Горизонтальными прямыми указаны границы полусектора: граница верхней части полусектора, равная плюс  $0,165 KPC$  и граница нижней части полусектора, равная минус  $0,165 KPC$ , и соответствующие им токи индикации плюс  $125\mu A$  и минус  $125\mu A$ , соответственно. Кроме того, горизонтальными прямыми указаны границы монотонного изменения информационного параметра и соответствующие им токи  $I = \pm 315\mu A$ .

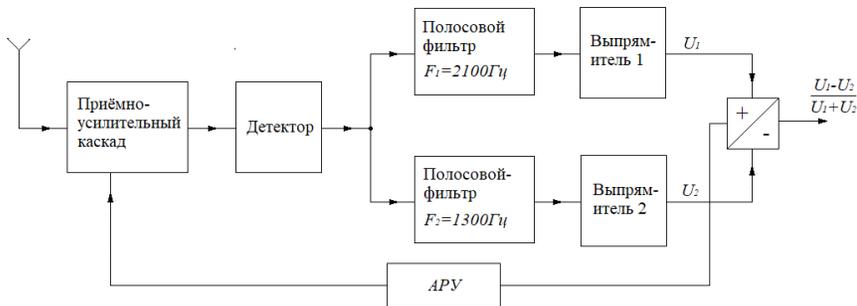


Рис. 9. Упрощенная блок-схема бортового приемника-измерителя КРС

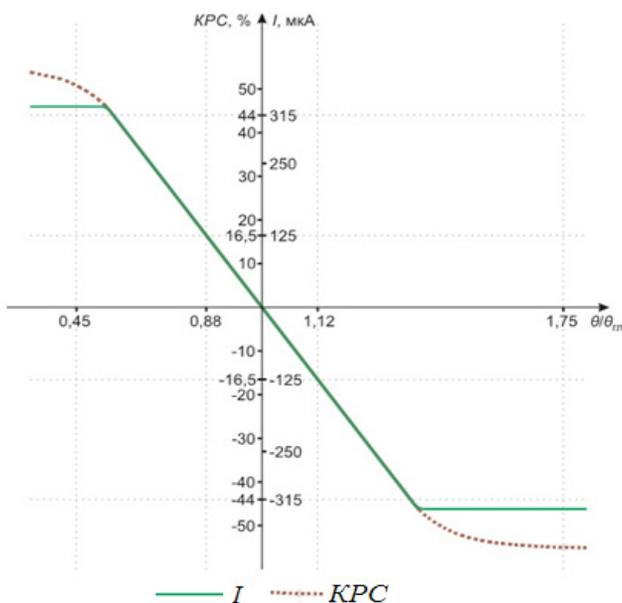


Рис. 10. Зависимость  $KPC$  и тока индикации от нормированного угла места,  $KPC, I$

В пределах полусектора  $|KPC| \leq 16,5\%$  должна наблюдаться линейная зависимость тока индикации от угла отклонения от глissады. За пределами полусектора ток индикации должен монотонно увеличиваться по абсолютной величине до указанной границы  $I = \pm 315 \mu\text{кА}$ . За пределами указанного участка монотонного изменения функции  $KPC(\theta)$  не должен по абсолютной величине быть меньше  $315 \mu\text{кА}$  вплоть до углов  $0,45\theta_{2л}$  и  $1,75\theta_{2л}$ . Это требование условно показано на рис. горизонтальными пунктирными линиями.

Выполнялись стандартные заходы [13]. Заметим, что измерениями по заходам по нулю глissады, по верхнему и по нижнему полусекторам было установлено следующее. На основном и противоположном направлениях границы полусектора выше и ниже линии глissады установлены в пределах  $(0,12 \pm 0,2)\theta_{2л}$ .

На рис. 11 приведена зависимость тока индикации, равного току, поступающему на пилотажный прибор, и зависимость тока устройства траекторной записи (УТЗ) при горизонтальном полете ВСЛ на высоте 300 м по основному направлению захода самолетов на посадку на аэродром, а на рис.12 – при полете по противоположному направлению, соответственно.

Рисунки отличаются друг от друга разным горизонтальным масштабом. В левой части каждого рисунка приведены записи калибровки тока индикации  $I$  в  $\frac{\mu\text{кА}}{\text{град}}$  и тока калибровки УТЗ  $\frac{\mu\text{кА}}{\text{град}}$ .

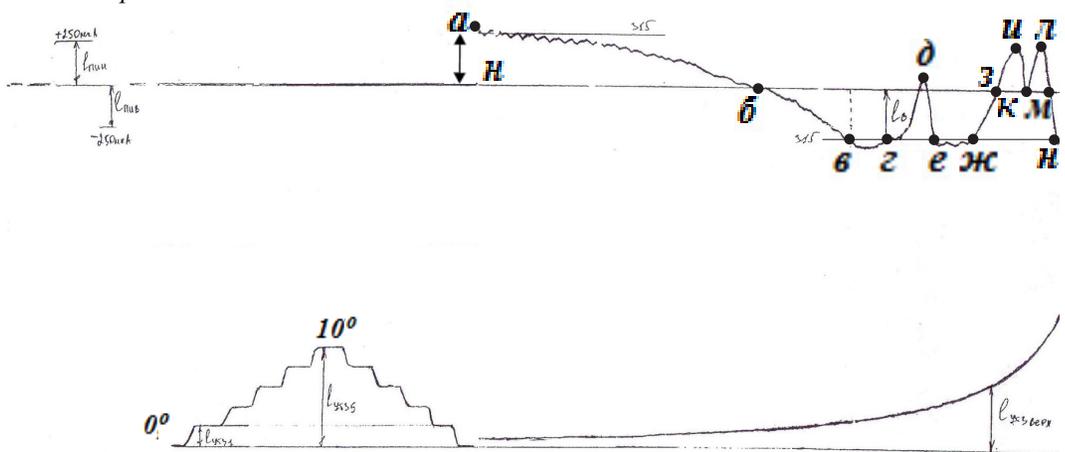


Рис. 11. Ток индикации и ток УТЗ при полёте на высоте 300 м в основном направлении

По графику тока УТЗ (нижняя кривая на рис.11, 12) можно определить угол точки наблюдения ВСЛ относительно горизонта в си-

стеме координат с началом на позиции УТЗ. В верхней части рисунка приведена зависимость тока индикации. На графиках буквами, **а – н** отмечены характерные точки. Угловые координаты характерных точек на графике зависимости тока индикации при полете по основному направлению и в обратном направлении указаны в таблицах 1 и 2, соответственно.

Рассмотрим поведение тока индикации от расстояния в сечении при полете на высоте 300 м на основном направлении. Обратимся к рис. 11 и таблице 1.

На графике на рис.11 буквами **а-н** обозначены характерные точки зависимости тока  $I(\mu\text{кА})$  от расстояния. В таблице указаны угловые координаты характерных точек.

В третьей строке таблицы указано отношение угловой координаты каждой точки к углу глissады.

На графике буквой **а** отмечена точка ( $\theta_a = 1,87^\circ$ ), до которой ток индикации при отклонении от глissады вниз возрастает до величины плюс  $315 \mu\text{кА}$ . Точка **б** ( $\theta_b = 2,67^\circ$ ) – точка перехода кривой тока индикации через нуль. Это означает, что точка **б** находится непосредственно на глissаде. Угол глissады равен  $2,67^\circ$ . Точкой **в** ( $\theta_v = 4,28^\circ$ ) отмечена точка, до которой ток индикации при отклонении от глissады вверх возрастает по абсолютной величине до величины  $315 \mu\text{кА}$ . Заметим, что на отрезке  $\theta_a < \theta < \theta_v$  с ростом угла места ток индикации монотонно убывает от величины плюс  $315 \mu\text{кА}$  в точке **а** до нулевого значения в точке **б** ( $\theta_b = 2,67^\circ$ ) на глissа-

де и далее до минус  $315 \mu\text{кА}$  в точке **в** под углом места  $\theta_v$  ( $\theta_v = 4,28^\circ$ ).

Точка **з** ( $\theta_z = 8,02^\circ$ ) и точка **м** ( $\theta_m = 13,37^\circ$ )

**Угловые координаты характерных точек на записи тока индикации на основном направлении посадки**

Точки	а	б	в	г	д	е	ж	з	и	к	л	м	н	о	п
$\theta_v$	1,87	2,67	4,28	4,8	5,35	5,88	6,95	8,02	9,09	10,7	12,3	13,37	15	5,3	5,4
$\theta_v / \theta_{21}$	0,7	1	1,4	1,8	2	2,2	2,6	3	3,4	4	4,6	5	5,6	1,98	2,02

– это точки, соответствующие углу, равному  $3\theta_{21}$  и  $5\theta_{21}$ , соответственно. На отрезке от точки **в** до точки **ж** график функции тока имеет форму близкую к горизонтальной прямой с возвышением по середине отрезка. Возвышение имеет форму сечения конуса с закругленным наконечником. Вершина возвышения (точка **д**,  $\theta_0 = 5,35^\circ$ ) приходится на угол, равный удвоенному углу глиссады. Максимальное значение тока в точке **д** ( $\theta_0 = 5,35^\circ$ ) равно плюс 75  $\mu\text{кА}$ .

На участке между двумя максимумами в точках **и** ( $\theta_u = 9,09^\circ$ ) и **л** ( $\theta_u = 12,3^\circ$ ) наблюдается углубление в форме сечения конуса с закругленным наконечником. Минимум углубления приходится на угол  $\theta_k = 10,7^\circ$ , равный по величине примерно . Минимальное значение тока в минимуме углубления равно нулю.

Особенностью рассматриваемой зависимости является то, что в промежутке  $(\theta_{21}, 3\theta_{21})$  существует две точки в окрестности точки **д** с нулевым значением КРС. Одна из них точка **о** ( $\theta_0 = 5,08^\circ$ ) находится на промежутке  $(\theta_{21}, 2\theta_{21})$ . Однако точку **о** нельзя считать, лежащей на ложной глиссаде, так как ее координата, равная  $5,08^\circ$ , больше координаты границы зоны действия ГРМ в вертикальной плоскости, равной  $1,75\theta_{21} = 4,7^\circ$ .

Таким образом, характеристика ГРМ на основном направлении соответствует требованиям, предъявляемым к характеристикам ГРМ второй категории.

**Рассмотрим теперь поведение тока индикации в сечении при полете на высоте 300м по обратному направлению.** Обратимся теперь к рис.12 и табл. 2.

На графике буквой **а** отмечена точка

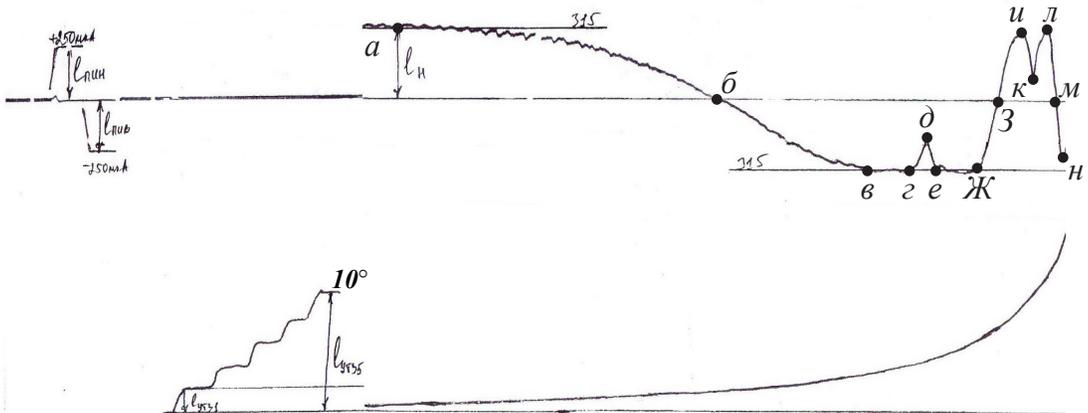


Рис. 12. Ток индикации и ток УТЗ при полёте на высоте 300 м на противоположном направлении

Таблица 2

**Угловые координаты характерных точек на записи тока индикации на противоположном направлении посадки**

Точки	а	б	в	г	д	е	ж	з	и	к	л	м	н
$\theta_v$	1,91	2,72	4,55	5,23	5,45	5,91	7,41	8,18	10,45	10,9	12,5	13,64	15,9
$\theta_v / \theta_{21}$	0,7	1	1,67	1,92	2	2,17	2,72	3	3,84	4	4,6	5	5,66

( $\theta_a = 1,91^\circ$ ), до которой ток индикации при отклонении от глissады вниз возрастает до величины плюс ( $\theta_a = 1,91^\circ$ ),  $315 \mu\text{кА}$ . Точка  $\theta_b$  ( $\theta_b = 2,72^\circ$ ) – это точка перехода кривой тока индикации через нуль. Следовательно, точка  $\theta_b$  – это точка непосредственно на глissаде. Угол глissады равен  $2,72^\circ$ . Точкой  $\theta_v$  ( $\theta_v = 4,55^\circ$ ) отмечена точка, до которой ток индикации при отклонении от глissады вверх возрастает по абсолютной величине до  $315 \mu\text{кА}$ . Заметим, что на отрезке  $\theta_a < \theta < \theta_v$  с ростом угла места ток индикации монотонно убывает от величины плюс  $315 \mu\text{кА}$  в точке  $\theta_a$  до нулевого значения в точке  $\theta_b$  ( $\theta_b = 2,72^\circ$ ) на глissаде и далее до минус  $315 \mu\text{кА}$  в точке  $\theta_v$  под углом места  $\theta_v$  ( $\theta_v = 4,55^\circ$ ). Точка  $\theta_z$  ( $\theta_z = 8,18^\circ$ ) и точка  $\theta_m$  ( $\theta_m = 13,64^\circ$ ) – это точки, в которых ток индикации равен нулю, в этих точках  $\theta_z = 3\theta_{2z}$  и  $\theta_m = 5\theta_{2z}$  соответственно. На отрезке от точки  $\theta_v$  до точки  $\theta_{ж}$  ( $\theta_{ж} = 7,41^\circ$ ) график функции тока имеет форму близкую к отрезку горизонтальной прямой с возвышением по середине отрезка. Возвышение имеет форму сечения конуса с закруглением. Вершина возвышения (в точке  $\theta_d$ ,  $\theta_d = 5,45^\circ$ ) приходится на угол, равный удвоенному углу глissады. Величина тока в точке  $\theta_d$  ( $\theta_d = 5,45^\circ$ ) равна минус  $60 \mu\text{кА}$ .

На участке между двумя максимумами в точках  $\theta_u$ ,  $\theta_u = 10,45^\circ$  и  $\theta_l$ ,  $\theta_l = 12,5^\circ$  наблюдается углубление остроконечной формы. Минимум приходится на угол  $\theta_k = 11,36^\circ$ , равный четырем углам глissады. Величина тока на дне углубления равна плюс  $100 \mu\text{кА}$ .

Как видно, характеристика ГРМ отличается от идеальной характеристики, соответствующей соотношению высот верхней и нижней антенн строго 2:1, лишь тем, что в зависимости  $KPC(\theta)$  в окрестности двойного угла глissады наблюдается минимум. Однако, область с величинами КРС  $< 41,5\%$ , находится выше угла, равного  $1,75\theta_{гн}$ .

При отклонении от линии глissады вверх  $KPC(\theta)$  возрастает до угла  $1,75\theta_{гн}$  не менее чем на  $41,5\%$ . При отклонении от линии глissады вниз возрастает до величины  $41,5\%$  под углом до угла  $0,65\theta_{гн}$ . И далее остается неизменной до угла  $0,3\theta_{гн}$  (на рис не показано).

Таким образом, характеристика ГРМ на противоположном направлении также полностью соответствует требованиям, предъявляемым к характеристикам ГРМ второй категории.

Примечание. На данных осциллограммах

нет отметок дальнего и ближнего маркерных радиомаяков, которые позволяют более точно скорректировать координаты самолета в процессе измерения характеристик радиомаяков.

### Обсуждение результатов

В статье представлено подробное изложение принципа работы глissадного радиомаяка, поскольку в известной журнальной и методической литературе принцип работы ранее не был детально представлен. Далее, в обычно используемом предположении идеальной проводимости подстилающей поверхности в виде горизонтальной плоскости найдены соотношения для вычисления параметров зоны глissады. При этом зависимость КРС от угла места описывается косинусоидальной функцией от обобщенного угла  $khs \sin \theta$ . Оказывается, что для формирования номинальной крутизны зоны отношение  $a$  амплитуды тока в верхней антенне к амплитуде тока в нижней антенне должно быть равным  $0,44$ . Именно при этом значении  $a$  выполнен теоретический анализ и в том случае, когда подстилающая поверхность имеет реальные параметры.

В дециметровом диапазоне диэлектрическую проницаемость почвы можно с достаточной для практики точностью считать величиной вещественной. Учет реальных параметров почвы показывает, что в интерференционных минимумах уровень амплитудной ДН имеет хотя и небольшое, но все-таки конечное значение. При расчете зависимости КРС от угла места исчезает неопределенность вида  $0/0$ , характерная при идеальной проводимости подстилающей поверхности для угла места, равного удвоенному значению угла глissады. Одновременно с этим исчезает строго косинусоидальная зависимость КРС от угла места. График зависимости КРС при  $2h_1 = h_2$  в окрестности углов, равных четному количеству угла глissады, приобретает вид, известный в литературе как вид кривой конического сечения с закруглением малого радиуса (вид "клювика"). Однако, эти отличия от косинусоидальной зависимости при летных измерениях при строго выдержанном соотношении высот 2:1 не могут быть замечены, а КРС при этом по абсолютной величине больше  $41,5\%$  и, стало быть, не выходит за пределы ограничений.

Отличия КРС от косинусоидальной зависимости усугубляются со случайным или преднамеренным введением ошибки в уста-

новку нижней антенны ( $2h_1 = h_2$ ). Так при ошибке в одну длину волны на границе зоны ГРМ формируется ложная глиссада. Ниже удвоенного угла глиссады формируется неверная информация о нахождении точки наблюдения относительно глиссады. Тем не менее, асимметрия зоны, определяемая по показаниям КРС на уровне плюс 16,5% и на уровне минус 16,5% пренебрежимо мала. Практически показания на этих уровнях сохранились неизменными. В связи с этим следует сделать важное замечание. При вводе ГРМ в эксплуатацию и в период плановых проверок (два раза в год) обнаруженную в процессе летных настроек ГРМ асимметрию зоны пытаются устранить изменением высоты подвеса нижней антенны. Как видно из приведенного примера, по крайней мере в случае строго плоской подстилающей поверхности, изменением высоты подвеса нижней антенны устранить асимметрию зоны глиссады не представляется возможным. А приобрести неприятности в виде ложной глиссады возможно.

Поэтому, целесообразно при вводе ГРМ в эксплуатацию установить соотношение высот подвеса верхней и нижней антенн как возможно точно в соотношении 2:1.

Летные измерения характеристик ГРМ подтвердили найденные теоретически зако-

номерности в поведении зависимости  $KPC(\theta)$ .

Найденные закономерности в поведении зависимости  $KPC(\theta)$  полезно применять при летной настройке ГРМ при выводе ГРМ в эксплуатацию.

### Выводы

Учет подстилающей поверхности как границы раздела двух диэлектрических сред: воздух-почва, объясняет особенности поведения характеристики ГРМ в окрестности двойного угла глиссады. График зависимости КРС при  $2h_1 = h_2$  в окрестности углов, равных четному числу угла глиссады, приобретает вид, известный в литературе как вид кривой конического сечения с закруглением малого радиуса («вид клювика».)

При ошибке в установке высоты подвеса нижней антенны порядка одной длины волны может в зоне глиссады, может формироваться ложная глиссада.

С целью сохранения целостности системы посадки необходимо при вводе ГРМ в эксплуатацию установить соотношение высот подвеса верхней и нижней антенн как можно точно в соотношении 2:1.

Анализ поведения тока индикации в широком секторе углов на основе найденных закономерностей оказывается полезным для выполнения летной настройки ГРМ.

---

### Литература

1. Галенко В. Некоторая статистика катастроф при заходе на посадку и посадке (AVIASAFETY.RU) (по базе данных Международного консультативно-аналитического агентства «Безопасность полетов»). – URL:<https://aviator.guru> (дата обращения 17.09.2020 г.).
2. Шатраков Ю.Г. Безопасность полетов. – URL:<https://topwar.ru> (дата обращения 05.10.2020 г.).
3. Пахолков Г.А., Кашинов В.В., Соломоник М.Е., Шатраков Ю.Г. Угломерные радиотехнические системы посадки: (Прогнозирование точностных характеристик) — М.: Транспорт, 1982. – 159 с.
4. Посадочная радиомаячная группа дециметрового диапазона ПРМГ 76УМ. – URL:[www.polyot.ru/products/24](http://www.polyot.ru/products/24) (дата обращения 25.09.2020 г.).
5. Воробьев В.В., Киселев А.М., Поляков В.В. Системы управления летательных аппаратов: учебник для курсантов-слушателей вузов ВВС. Под ред. В.В.Воробьева. – М.: Изд. ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского. – 2008. – 203 с.
6. Микоян С.А., Корбут А.Г. Заход на посадку по приборам. – М.: Военное издательство Министерства обороны СССР. – 1979. – 48 с.
7. Радиомаячные системы посадки и системы VOR: Учебное пособие. / Сост.: А.В. Хафизов – Кировград: ГЛАУ. – 2009. – 83 с.
8. Павлов Ю.В. Глиссадный радиомаяк: Учебное пособие / Ю.В. Павлов. М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского. – 1960. – 52 с.
9. Системы радиомаячные дециметрового диапазона второй категории инструментального захода самолетов на посадку. Общие технические требования. Основные параметры. ГОСТ 15827 – 70
10. Системы инструментального захода самолетов на посадку радиомаячные. Термины и определения. ГОСТ 26121 -84. М.: Госкомитет СССР по стандартам.
11. Нормы годности к эксплуатации аэродромов экспериментальной авиации (НГЭА ЭА). Приказ

Минпромторга РФ от 30.12.2009 № 1215 «Об утверждении нормативных методических документов, регулирующих функционирование и эксплуатацию аэродромов экспериментальной авиации». Зарегистрировано в Минюсте РФ 5 апреля 2010 г. Регистрационный № 16822.

12. Электрические характеристики земной поверхности. ИТУ: Международный союз электросвязи. Серия Р. Распространение радиоволн. Рекомендация МСЭ-R P.527-4(06/2017).

13. Васильева Е.Ф. Методика летной проверки радиомаячных систем посадки и навигации с помощью аппаратуры летного контроля АСЛК-75 / Е.Ф. Васильева (ред.). – ВВС, 1995. – 212 с.

## References

1. Galenko V. Nekotoryaya statistika katastrof pri zakhode na posadku i posadke (AVIASAFETY.RU) (po baze dannykh Mezhdunarodnogo konsultativno-analiticheskogo agentstva «Bezopasnost' poletov»). – URL:[https://aviator.guru\(data obrashcheniya 17.09.2020 g.\)](https://aviator.guru(data obrashcheniya 17.09.2020 g.)).

2. Shatrakov YU.G. Bezopasnost' poletov. – URL:[https://topwar.ru \(data obrashcheniya 05.10.2020 g.\)](https://topwar.ru (data obrashcheniya 05.10.2020 g.)).

3. Pakholkov G.A., Kashinov V.V., Solomonik M.Ye., Shatrakov YU.G. Uglomernyye radiotekhnicheskiye sistemy posadki: (Prognozirovaniye tochnostnykh kharakteristik) — М.: Transport, 1982. – 159 s.

4. Posadochnaya radiomayachnaya gruppa detsimetrovogo diapazona PRMG 76UM. – URL:[www.polyot.ru/products/24 \(data obrashcheniya 25.09.2020 g.\)](http://www.polyot.ru/products/24 (data obrashcheniya 25.09.2020 g.)).

5. Vorob'yev V.V., Kiselev A.M., Polyakov V.V. Sistemy upravleniya letatel'nykh apparatov: uchebnik dlya kursantov-slushateley vuzov VVS. Pod red. V.V.Vorob'yeva. – М.: Izd. VVIA im. prof. N.Ye. Zhukovskogo. – 2008. – 203 s.

6. Mikoyan S.A., Korbut A.G. Zakhod na posadku po priboram. – М.: Voennoye izdatel'stvo Ministerstva oborony SSSR. – 1979. – 48 s.

7. Radiomayachnyye sistemy posadki i sistemy VOR: Uchebnoye posobiye. / Sost.: A.V. Khafizov – Kirovograd: GLAU. – 2009. – 83 s.

8. Pavlov YU.V. Glissadnyy radiomayak: Uchebnoye posobiye / YU.V. Pavlov. М.: VVIA im. prof. N.Ye. Zhukovskogo. – 1960. – 52 s.

9. Sistemy radiomayachnyye detsimetrovogo diapazona vtoroy kategorii instrumental'nogo zakhoda samoletov na posadku. Obshchiye tekhnicheskiye trebovaniya. Osnovnyye parametry. GOST 15827 – 70.

10. Sistemy instrumental'nogo zakhoda samoletov na posadku radiomayachnyye. Terminy i opredeleniya. GOST 26121 -84. М.: Goskomitet SSSR po standartam.

11. Normy godnosti k ekspluatatsii aerodromov eksperimental'noy aviatsii (NGEA EA). Prikaz Minpromtorga RF ot 30.12.2009 № 1215 «Ob utverzhenii normativnykh metodicheskikh dokumentov, reguliruyushchikh funktsionirovaniye i ekspluatatsiyu aerodromov eksperimental'noy aviatsii». Zaregistrirvano v Minyuste RF 5 aprelya 2010 g. Registratsionnyy № 16822.

12. Elektricheskiye kharakteristiki zemnoy poverkhnosti. ИТУ: Mezhdunarodnyy soyuz elektrosvyazi. Seriya R. Rasprostraneniye radiovoln. Rekomendatsiya MSE-R P.527-4(06/2017).

13. Vasil'yeva Ye.F. Metodika letnoy proverki radiomayachnykh sistem posadki i navigatsii s pomoshch'yu apparatury letnogo kontrolya ASLK-75 / Ye.F. Vasil'yeva (red.). – VVS, 1995. – 212 s.

---

**ВОЙТОВИЧ Николай Иванович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой конструирования и производство радиоаппаратуры, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет). 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76. E-mail: voytovichni@mail.ru

**VOYTOVICH Nikolay Ivanovich**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Design and Production of Radio Equipment, South Ural State University (National Research University). 76, Lenin prospect, Chelyabinsk, 454080, Russia. E-mail: voytovichni@mail.ru

**ЖДАНОВ Борис Викторович**, кандидат технических наук, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет). 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76. E-mail: boris.z@inbox.ru

**ZHDANOV Boris Victorovich**, PhD in Engineering sciences, South Ural State University (National Research University). 76, Lenin prospect, Chelyabinsk, 454080, Russia. E-mail: boris.z@inbox.ru

**ЕРШОВ Алексей Валентинович**, кандидат технических наук, Южно-Уральский государ-

ственный университет (национальный исследовательский университет). 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76. E-mail: eav@list.ru

**ERSHOV Aleksey Valentinovich**, PhD in Engineering sciences, South Ural State University (National Research University). 76, Lenin prospect, Chelyabinsk, 454080, Russia. E-mail: eav@list.ru

**ЮНГАЙТИС Екатерина Михайловна**, младший научный сотрудник, ООО «КОНСТРУКТОРСКОЕ БЮРО «ЭКРАН» имени М.А. Шильмана». 454080, г. Челябинск, ул. Энтузиастов, дом 26Б; аспирант, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет). 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76. E-mail: jungaitis92@gmail.ru

**IUNGAITIS Ekaterina Mikhailovna**, junior researcher, LLC "DESIGN BUREAU" EKRAN "named after M.A. Shilman". Building 26B, st. Enthusiasts, Chelyabinsk, 454080, Russia; postgraduate, South Ural State University (National Research University). 76, Lenin prospect, Chelyabinsk, 454080, Russia. E-mail: jungaitis92@gmail.ru