

## АНАЛИТИЧЕСКАЯ ПРОГНОЗНО-ВРЕМЕННАЯ МОДЕЛЬ РАДИОКАНАЛА ПЕРЕДАЧИ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ С БОРТА ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

А. С. Дуников

*Усложнение бортовой радиоэлектронной аппаратуры летательных аппаратов приводит к необходимости ужесточения требований по полноте контроля ее функционирования, осуществляемого посредством анализа телеметрической информации, переданной с их борта при проведении летных испытаний. Процесс разработки новых подходов приема и обработки телеметрической информации, которые смогут обеспечить высокую достоверность зарегистрированной информации, должен учитывать особенности передачи радиосигнала во внешней возмущающей среде. В статье синтезирована аналитическая прогнозно-временная модель радиоканала передачи телеметрической информации, учитывающая процессы возникновения флуктуаций амплитуды принимаемого сигнала на различных участках траектории полета летательного аппарата. Применение аналитической прогнозно-временной модели радиоканала передачи телеметрической информации позволит обосновать разработку новых методов приема и обработки информации, учитывающих возникновение флуктуаций амплитуды сигнала.*

*Ключевые слова:* закон распределения, контроль технического состояния, летные испытания, летательный аппарат, радиоканал, статистические данные, телеметрическая информация, флуктуации амплитуды сигнала.

### Введение

В современных реалиях развития летательных аппаратов (ЛА) различного назначения особую ценность для обеспечения их надежной эксплуатации имеет телеметрическая информация (ТМИ), передаваемая с борта данных аппаратов. При этом для организаций, разрабатывающих и эксплуатирующих ЛА, существует острая необходимость получения ТМИ, обладающей наибольшей достоверностью, так как по результатам ее анализа подтверждаются заданные летно-технические характеристики указанных аппаратов, и оценивается их техническое состояние в полете [1]. Изменение функциональных возможностей ЛА, в частности, снижение высоты полета и увеличение скорости их перемещения, в силу различных обстоятельств, значительно ухудшило качество приема ТМИ. В связи с этим разработка подходов и методов, позволяющих повысить помехоустойчивость приема ТМИ в различных условиях функционирования ЛА, в настоящее время приобретает достаточно большую актуальность. При этом разрабатываемые подходы и методы передачи, приема и обработки ТМИ должны учитывать различные характеристики и особенности радиоканала передачи ТМИ.

### Особенности передачи телеметрической информации при проведении летных испытаний летательных аппаратов

Процесс передачи ТМИ с борта ЛА при проведении их летных испытаний (ЛИ) и эксплуатации должен обязательно учитывать особенности применения ЛА. В частности, для современных ЛА процесс передачи ТМИ характеризуется следующими особенностями:

– первая особенность заключается в возможностях достижения ЛА высокой скорости полета, что

приводит к возникновению эффекта опережающей ионизации (предионизации), обусловленного фотоионизацией набегающего потока газа ультрафиолетовым излучением, выходящим из высокотемпературного слоя за фронтом ударной волны [2]. В связи с этим характер прохождения радиоволн через слой плазменных образований будет определяться процессом переотражения радиоволн. В данном случае канал передачи ТМИ представляет собой канал с флуктуирующей амплитудой, а математически описывается как канал многолучевого распространения при отсутствии луча прямой видимости;

– вторая особенность заключается в том, что ЛА многих типов обладают широкими маневренными возможностями, в частности, возможностями полета на различных высотах (в том числе и на предельно низких), изменения траектории движения, вращения. В связи с этим передающая антенна (передатчик) постоянно изменяет вектор биссектрисы угла диаграммы направленности к земной поверхности (приемнику), что приводит к появлению эффектов переотражений сигнала от земной поверхности [3]. В данном случае канал передачи ТМИ представляет собой канал с флуктуирующей амплитудой, а математически описывается как канал многолучевого распространения при наличии луча прямой видимости.

При этом помехи, вызываемые многолучевым распространением, в рамках проведения ЛИ практически всех ЛА, являются причиной замираний и прерываний радиосигнала при приеме ТМИ. Дополнительные лучи (пути) распространения радиосигнала возникают вследствие рассеивания, затухания и отражения электромагнитных волн от объектов окружающей среды, слоя ионизации. Степень искажения принимаемого сигнала зависит от числа и мощности побочных лучей, а также характеристик

диаграммы направленности приемной антенны. Следует отметить, что исходя из практики проведения испытаний, в реальном телеметрическом канале связи, как правило, всегда имеется компонента прямой видимости и очень часто – компоненты отраженных волн и диффузного рассеяния.

Вследствие сложных условий передачи группового телеметрического радиосигнала, обусловленных вибрациями корпуса ЛА, полетом на предельно низких высотах, а также вследствие движения на высокой скорости возникают случайные флуктуации амплитуды принимаемого радиосигнала. При этом различают флуктуации трех типов [4]:

1. Быстрые флуктуации или флуктуации мгновенных значений сигнала, причиной которых может быть интерференция двух или большего числа медленно меняющихся копий сигнала, приходящих по различным путям. Эти флуктуации могут быть названы многолучевым распространением, которое часто приводит к полной потере информации (при сложении лучей в противофазе).

2. Флуктуации мгновенных значений сигнала относительно его средней амплитуды. Эти флуктуации происходят относительно медленно и вследствие изменения затухания в среде при распространении сигнала между двумя географическими пунктами.

3. Медленные флуктуации, проявляющиеся в среднечасовых изменениях уровня сигнала, которые обусловлены особенностями распространения радиоволн в тропосфере.

При проведении ЛИ ЛА наиболее характерными являются быстрые флуктуации амплитуды принимаемого телеметрического радиосигнала с периодом долей секунды. В теоретических выкладках к существующим моделям построения обнаружителей сигнала в условиях быстрых флуктуаций амплитуды сигнала почти всегда вводится модель рэлеевских флуктуаций, несмотря на то, что известны частые и серьезные отклонения от этой модели [4]. Так, в частности, для узкополосных сигналов, к которым относятся непосредственно и сигналы, передаваемые бортовой телеметрической аппаратурой, многолучевое распространение служит причиной появления случайных флуктуаций огибающей принимаемого сигнала, при условии наличия канала прямой видимости и функции плотности вероятности распределения огибающей сигнала, описываемой обобщенным законом Рэлея (законом Райса, Рэлея – Райса).

В работе [5] подчеркивается, что в соответствии с экспериментальными исследованиями при интервалах наблюдения, равных нескольким десяткам

минут, мгновенные значения амплитуды сигнала в 20 – 40 процентах случаев распределены по закону Рэлея. В остальных случаях наблюдается обобщенный закон Рэлея (закон Райса).

Таким образом, следует сделать заключение о том, что канал передачи ТМИ может описываться математической моделью канала с аддитивным белым гауссовским шумом (АБГШ) и функцией плотности вероятности распределения огибающей сигнала, характеризуемой нормальным законом, а также моделями канала многолучевого распространения с флуктуирующей амплитудой и функцией плотности вероятности распределения огибающей сигнала, описываемой законом Рэлея и обобщенным законом Рэлея соответственно.

#### **Методический аппарат проверки закона распределения огибающей принимаемого группового телеметрического радиосигнала**

В целях подтверждения вышеуказанных теоретических выводов, а также уточнения законов распределения огибающей принимаемого радиосигнала на различных этапах полета ЛА проведена практическая проверка данных законов. Для этого изначально выполнен технический поиск регистрируемых в процессе сеанса измерений параметров сигнала, которые возможно использовать для дальнейшей статистической оценки. В ходе технического поиска определено, что наиболее объективным параметром, с использованием которого возможно оценить статистические характеристики принимаемого радиосигнала, в части фактического закона распределения его огибающей, является параметр автоматической регулировки усиления (АРУ), являющийся параметром внутренней телеметрии, регистрируемой многими малогабаритными приемными регистрирующими станциями ТМИ. Именно данный параметр характеризует изменение амплитуды (в том числе ее затухание и флуктуации) принимаемого радиосигнала на входе аппаратуры регистрации [6].

При оценке закона распределения огибающей принимаемого радиосигнала использовалась следующая методика:

1. На первом шаге с использованием вкладки «Внутренняя телеметрия» специального программного обеспечения «МПРС-воспроизведение» разработки Акционерного общества «Особое конструкторское бюро Московского энергетического института» (АО «ОКБ МЭИ») осуществляется воспроизведение файла внутренней телеметрии для выбранной записи ТМИ (рис. 1). В качестве файлов записи ТМИ использовались файлы сеансов измерений при пуске ракетносителя «Союз-2».

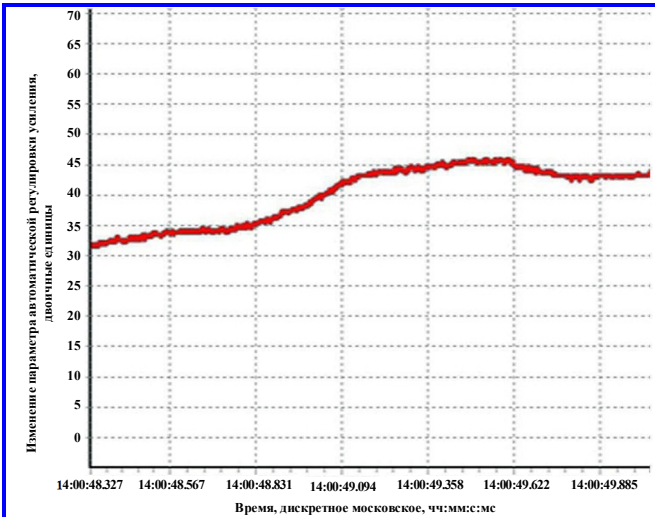


Рис. 1. График изменения параметра автоматической регулировки усиления для выбранного фрагмента файла записи телеметрической информации

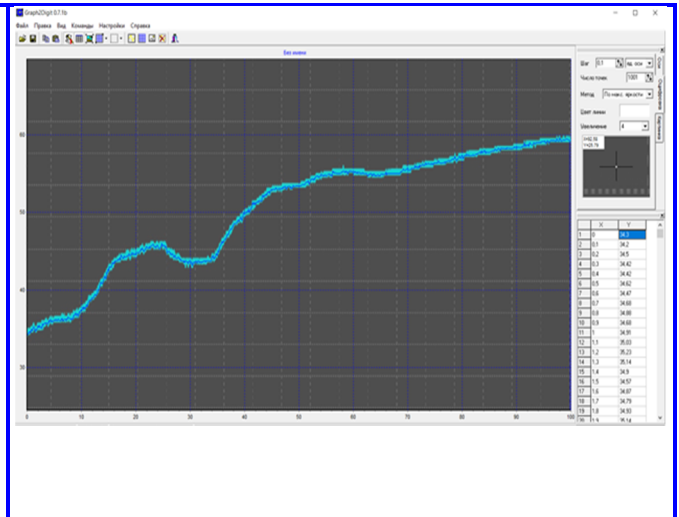
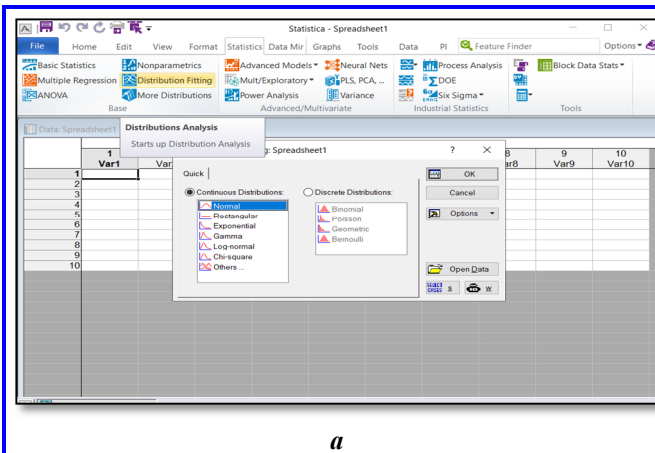
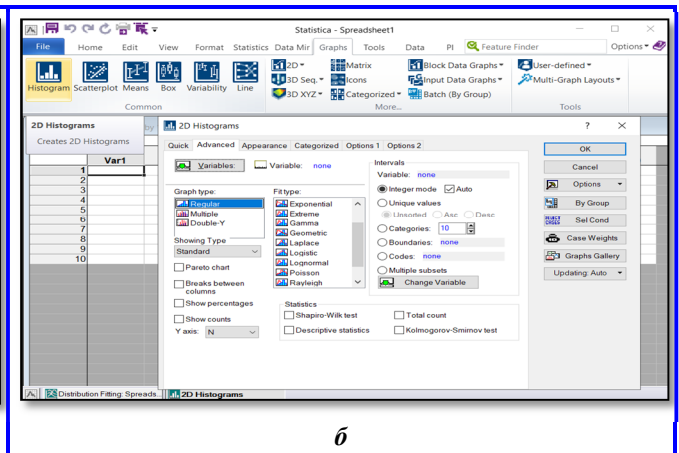


Рис. 2. Графический интерфейс программы Graph2Digit



а



б

Рис. 3. Интерфейс программного обеспечения Statistica 13.5 при использовании вкладок: а – Statistik. Distribution Fitting; б – Graphs. Histogram

2. На втором этапе производится выбор различных участков изменения параметра АРУ при полете ЛА. К данным этапам следует отнести: этап входа объекта телеконтроля в зону радиовидимости, этапы разделения конструктивных элементов, разворотов, возникновения нештатных ситуаций (для данных этапов особенно характерны потери информации), этапы штатного полета, этапы выхода объекта телеконтроля из зоны радиовидимости.

3. На третьем этапе с использованием специальной программы Graph2Digit производится оцифровка значений параметра АРУ  $ary_{oz}$  (где  $oz = \overline{1, знач.}$ , при этом «знач.» является последним числом выборки в зависимости от шага оцифровки значений параметра АРУ) из выбранных на первом этапе участков полета объекта телеконтроля и их сохранение в отдельном файле. Графический вид программы Graph2Digit представлен на рис. 2.

4. На следующем этапе осуществляется процесс преобразования оцифрованных значений  $ary_{oz}$  к значениям, изменяющимся в пределах от 0 до  $\infty$  посредством поэлементного вычитания из максимального целого значения АРУ ( $ary$ ), увеличенного на единицу каждого оцифрованного значения параметра АРУ (для значений, имеющих отрицательную фазу (значение)):

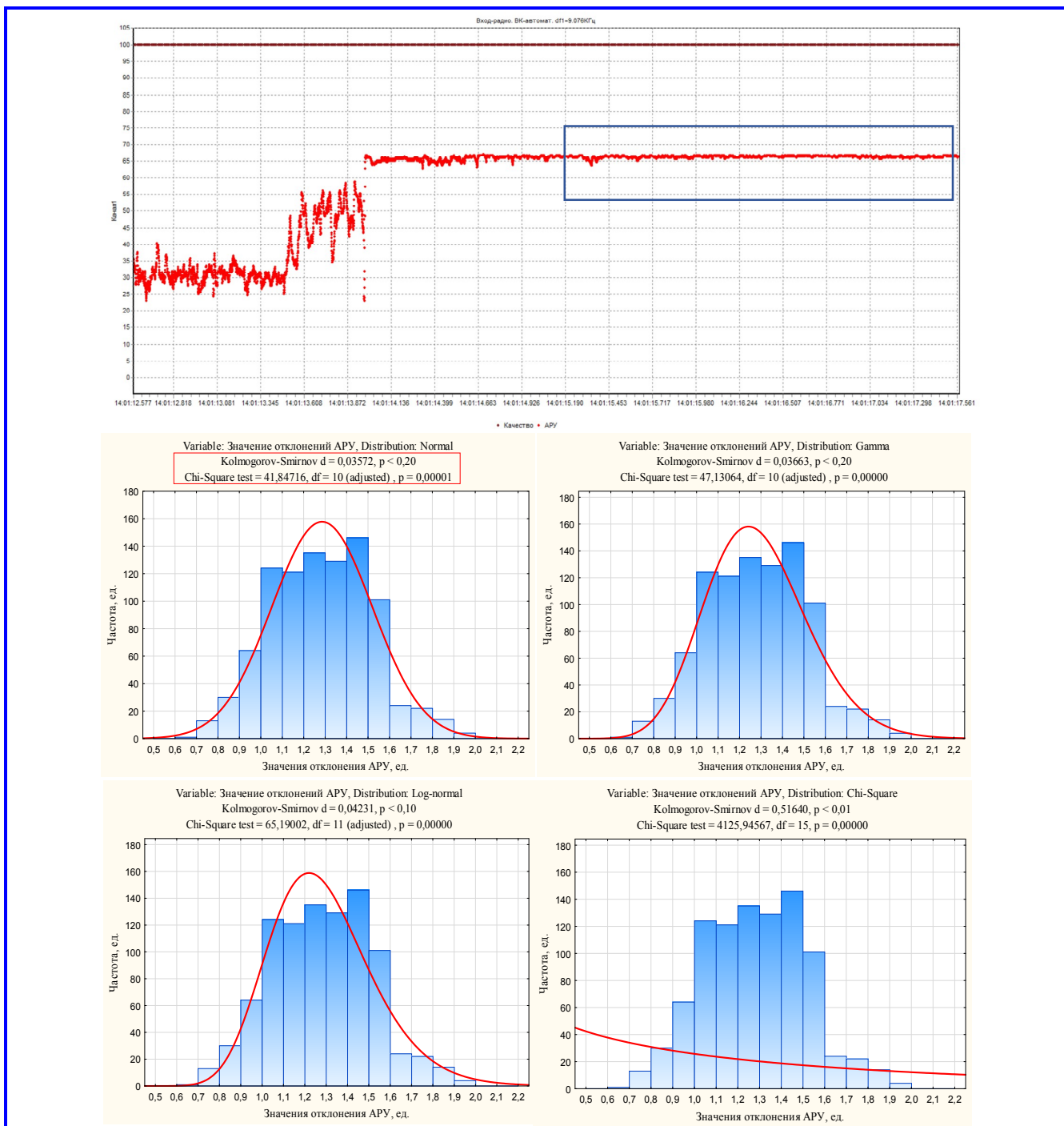
$$ary_{oz}^{итог} = (\text{round}(\max(ary) + 1)) - ary_{oz}, \quad oz = \overline{1, знач.} \quad (1)$$

Данное преобразование обусловлено тем, что основные непрерывные законы распределения изменяются в пределах от 0 до  $\infty$ .

5. На заключительном этапе с использованием вкладок Statistik. Distribution Fitting и Graphs. Histogram (внешние виды оконных форм данных функций представлены на рис. 3) программного

обеспечения Statistica 13.5, представляющее собой на настоящее время одно из основных и важных программных инструментов научного автоматизированного анализа данных, их визуализации, прогнозирования изменения и оценивания статистических характеристик [7], осуществляется оценивание закона распределения полученных значений параметра АРУ. С использованием

данной методики выполнено оценивание законов распределения огибающей флуктуирующей амплитуды принимаемого сигнала на основе анализа значений параметра АРУ внутренней телеметрии, зарегистрированных для различных этапов полета ракетносителя «Союз-2». Пример графических результатов оценивания представлен на рис. 4 – 6.



**Рис. 4. Графические результаты оценивания закона распределения параметра автоматической регулировки усиления на выбранном активном участке траектории полета летательного аппарата (выделен прямоугольником на верхнем графике)**

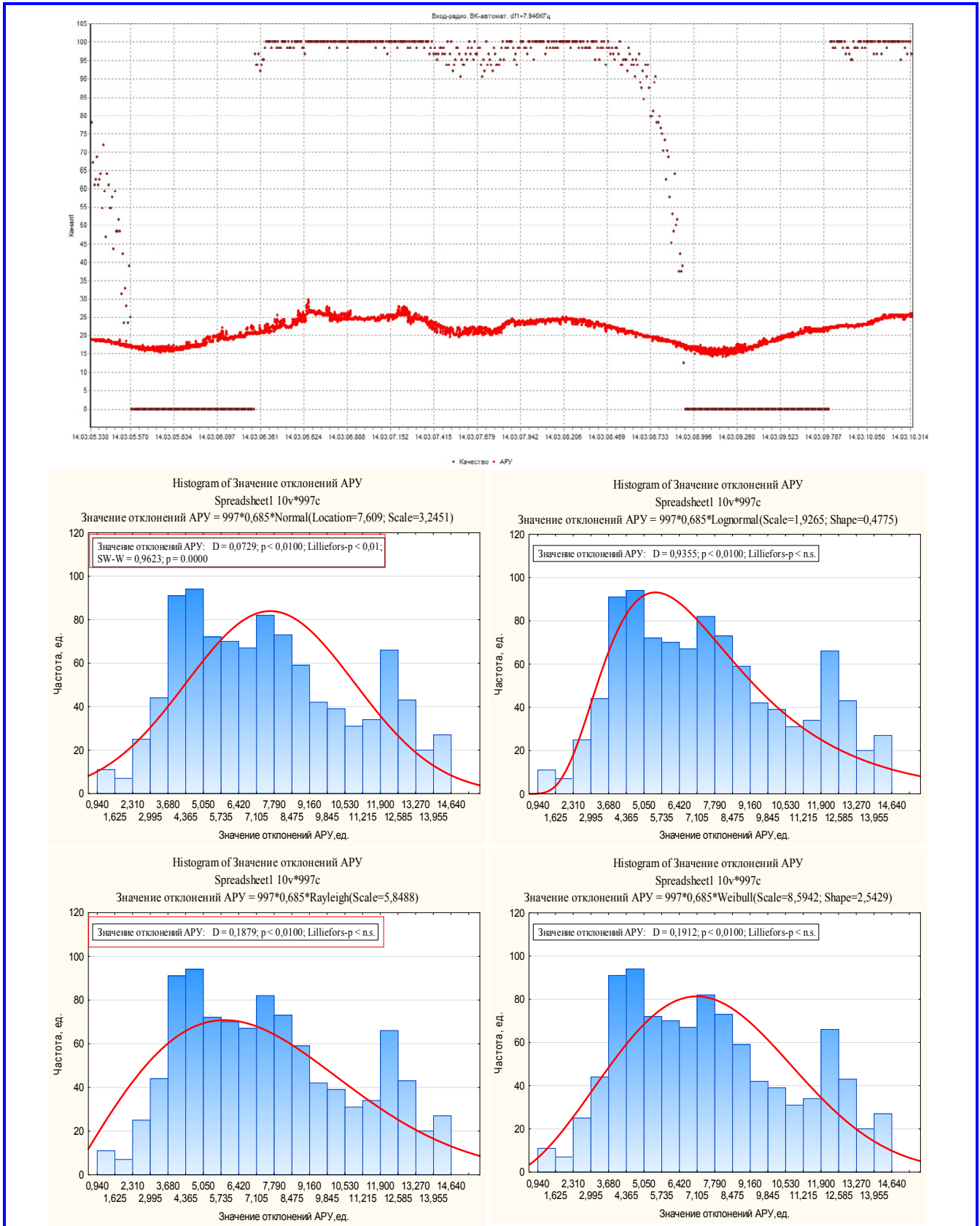
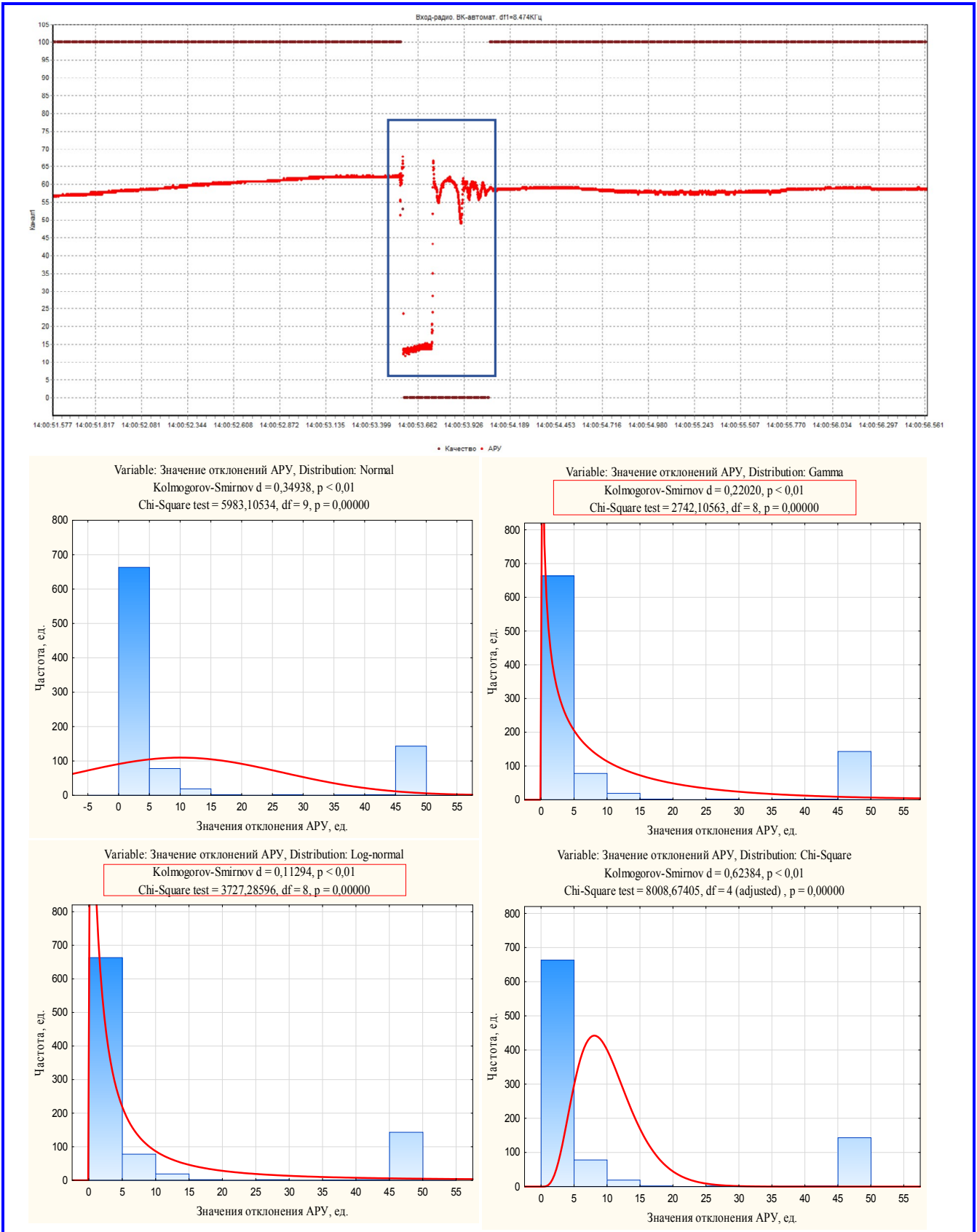


Рис. 5. Графические результаты оценивания закона распределения параметра автоматической регулировки усиления на этапе выхода летательного аппарата из зоны радиовидимости приемных средств



**Рис. 6. Графические результаты оценивания закона распределения параметра автоматической регулировки усиления на выбранном участке потери телеметрической информации (выделен прямоугольником на верхнем графике)**

Таблица

**Результаты оценивания законов распределения огибающей флуктуирующей амплитуды принимаемого группового телеметрического сигнала на различных этапах полета летательного аппарата**

Этап полета (участок траектории)	Закон распределения	Этап полета (участок траектории)	Закон распределения
Этап начального входа ЛА в зону радиовидимости (ЗРВ) приемных средств, угол места объекта телеконтроля относительно приемных средств $\geq 7$ градусов	Закон Рэлея	Участки отделения конструктивных элементов, выполнения маневров, возникновения различных вибрационных процессов на этапе активного участка траектории полета ЛА	закон Райса
Этап начального входа ЛА в ЗРВ приемных средств, угол места объекта телеконтроля относительно приемных средств $\leq 7$ градусов	Закон Райса	Этап постепенного выхода объекта телеконтроля из ЗРВ приемных средств, угол места объекта телеконтроля относительно приемных средств $< 7$ градусов	закон Райса
Этап активного участка траектории полета ЛА	Нормальный закон	Этап окончательного выхода из ЗРВ	закон Рэлея

В рамках оценивания законов распределения огибающей флуктуирующей амплитуды принимаемого радиосигнала проводилась проверка гипотез о законе распределения по статистическим критериям Колмогорова – Смирнова, хи-квадрату Пирсона, а также сравнение графического представления огибающей экспериментального закона распределения с теоретическим.

По итогам проведения оценивания законов распределения огибающей флуктуирующей амплитуды принимаемого радиосигнала, выполненного для различных участков траектории полета с использованием более десяти файлов записи ТМИ для различных сеансов измерений по пускам ракетополетов «Союз-2», получены экспериментальные данные, представленные в таблице.

Таким образом, полученные экспериментальные результаты показывают изменение закона распределения огибающей флуктуирующей амплитуды принимаемого радиосигнала на различных участках траектории полета ЛА. Достоверность полученных результатов подтверждается непротиворечивостью с известными теоретическими выводами, указанными в работах [4 – 5].

**Вывод аналитической зависимости прогнозно-временной модели радиоканала передачи телеметрической информации**

С использованием экспериментальных данных синтезируем аналитическую прогнозно-временную модель радиоканала передачи ТМИ, учитывающую процессы

возникновения флуктуаций амплитуды принимаемого сигнала на различных участках траектории полета ЛА.

Опишем модель радиоканала передачи ТМИ в виде следующей математической конструкции. Передаваемый групповой телеметрический сигнал описывается следующим выражением:

$$S_{\text{прм}}(t) = Af_{\text{прд}}(t - \tau_{\text{зад}}) \cos[\omega_{\text{прд}}(t - \tau_{\text{зад}}) + \varphi_{\text{прд}}(t - \tau_{\text{зад}})\theta_{\text{прд}}] + n(t), \quad (2)$$

где  $A$  – коэффициент, характеризующий нормированные амплитудные замирания сигнала;  $f_{\text{прд}}(t)$  – функция, определяющая закон амплитудной модуляции;  $\omega_{\text{прд}}(t)$  – функция, определяющая закон частотной модуляции;  $\varphi_{\text{прд}}(t)$  – функция, определяющая закон фазовой модуляции;  $\tau_{\text{зад}}$  – время запаздывания (задержки);  $\theta_{\text{прд}}$  – случайная (неизвестная) начальная фаза;  $n(t)$  – естественные помехи (белый гауссовский шум).

Для вывода выражения модели радиоканала передачи ТМИ на всей трассе полета летательного аппарата воспользуемся методикой, представленной в работе [8].

В соответствии с данной методикой базовым законом для описания закона распределения плотности вероятности случайного коэффициента, характеризующего нормированные амплитудные замирания сигнала, используется закон Райса, описываемый следующим выражением [9]:

$$W(A) = \frac{A}{\sigma_A^2} \exp\left(-\frac{A^2 + \alpha_p^2}{2\sigma_A^2}\right) I_0 \frac{A\alpha_p}{\sigma_A^2}, \quad (3)$$

где  $\alpha_p^2$  – мощность регулярной составляющей коэффициента  $A$ ;  $2\sigma_A^2$  – мощность флуктуационной составляющей коэффициента  $A$ ;  $I_0$  – модифицированная функция Бесселя первого рода нулевого порядка.

При этом для обеспечения равенства средней энергии принимаемого сигнала с замираниями энергии сигнала без замираний принято, что  $A^2 = \alpha_p^2 + 2\sigma_A^2 = 1$ .

В условиях возникновения релеевских замираний принимаемого сигнала, факт возникновения которых был статистически доказан выше для этапа начального входа ЛА в ЗРВ приемных средств, когда угол места объекта телеконтроля относительно приемных средств приблизительно равен 7 градусов и ниже или движения данного объекта на предельно низкой высоте, а также в слое ионизации, регулярная составляющая амплитудных замираний принимаемого сигнала  $\alpha_p^2 = 0$ .

Исходя из этого  $I_0\left(\frac{A \cdot 0}{\sigma_A^2}\right) = I_0(0)$ . С учетом данных значений функции Бесселя первого рода нулевого порядка [10] выражение  $I_0(0) = 1$ . Следовательно, выражение, описывающее закон распределения плотности вероятности случайного коэффициента, характеризующего нормированные амплитудные замирания сигнала, примет следующий вид:

$$W(A) = \frac{A}{\sigma_A^2} \exp\left(-\frac{A^2}{2\sigma_A^2}\right). \quad (4)$$

Выражение (4) описывает закон распределения плотности вероятности случайного коэффициента  $A$ , характеризующего нормированные амплитудные замирания сигнала, соответствующие закону Рэля.

Для этапа активного участка траектории полета летательного аппарата преобладающим является луч прямой видимости ( $\alpha_p^2 > 0,5$ ), а влияние отраженных лучей на качество приема несколько снижается, то есть значение мощности флуктуационной составляющей коэффициента  $A$  меньше значения регулярной составляющей. При этом для этапа активного участка траектории полета летательного аппарата характерен нормальный закон распределения случайной величины  $A$ . В рекомендациях Международного совета экспертов по радиосвязи по распределению вероятностей, касающихся моделирования распространения радиоволн [11], приведены результаты расчета распределения значений соотношения регулярной составляющей коэффициента, характеризующего нормированные амплитудные замирания сигнала, и его

флуктуационной составляющей для  $n$ -распределения Накагами, представленные на рис. 7.

Исходя из данных, представленных на рис. 7, нижняя граница расходимости распределения значений соотношения регулярной составляющей коэффициента, характеризующего нормированные амплитудные замирания сигнала, и его флуктуационной составляющей начинается со значения, равного 0,4. Значение величин функции Бесселя первого рода нулевого порядка при расчете от грани-

цы расходимости составляет  $I_0\left(\frac{A\alpha_p}{\sigma_A^2}\right)_{\sigma_A^2=0,4} \approx \frac{1}{2}$ . [10].

Данное значение функции Бесселя является наибольшим из возможных. С учетом этого, выражение, описывающее закон распределения плотности вероятности случайного коэффициента, характеризующего нормированные амплитудные замирания сигнала, примет следующий вид:

$$W(A) = \frac{A}{\sigma_A^2} \exp\left(-\frac{A^2 + \alpha_p^2}{2\sigma_A^2}\right) \frac{1}{2}. \quad (5)$$

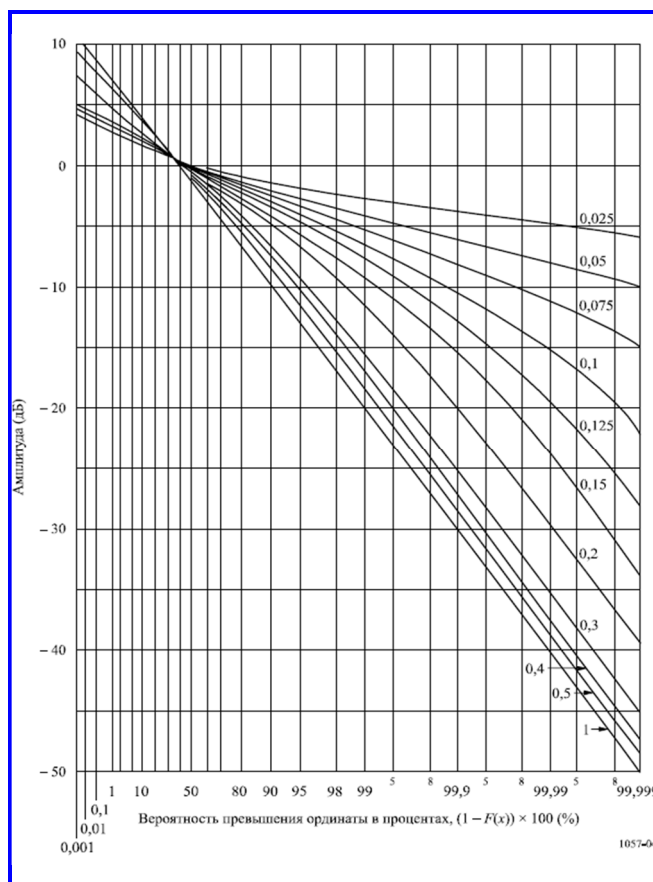


Рис. 7. График распределения Накагами – Райса для постоянного уровня мощности



Используя математические перестановки множителей элементов выражения (5) и учитывая, что  $A^2 = \alpha_p^2 + 2\sigma_A^2 = 1$  и  $\sigma_A^2 = 2\sigma_A$  получим:

$$W(A) = \frac{1}{4\sigma_A} \exp - \frac{1}{2} \left( \frac{A^2 + \alpha_p^2}{\sigma_A^2} \right). \quad (6)$$

При этом с учетом ориентировочного изменения  $0,4 > \sigma_A^2 \geq 0,1$

$$\begin{aligned} W(A) &= \frac{1}{4\sigma_A} \exp - \frac{1}{2} \left( \frac{A^2 + \alpha_p^2}{\sigma_A^2} \right) \approx \\ &\approx \frac{1}{\sigma_A \sqrt{2\pi}} \exp - \frac{1}{2} \left( \frac{A^2 + \alpha_p^2}{\sigma_A^2} \right). \end{aligned} \quad (7)$$

Выражение (7) описывает нормальный закон распределения плотности вероятности случайного коэффициента, характеризующего нормированные амплитудные замирения сигнала.

Обобщая результаты, полученные по итогам вывода выражений (2) – (7), выражение, описывающее модель радиоканала передачи телеметрической информации представляется в виде следующей математической конструкции:

$$\begin{aligned} Rl_k^{(1)} &= \frac{A}{\sigma_A^2} \exp \left( - \frac{A^2 + \alpha_p^2}{2\sigma_A^2} \right) rl(t), \\ \text{где} \begin{cases} rl(t) = 1, & \text{при } t = t^{(1)} \\ rl(t) = I_0 \left( \frac{A\alpha_p}{\sigma_A^2} \right), & \text{при } t = t^{(2)} \\ rl(t) = \frac{1}{2}, & \text{при } t = t^{(3)} \end{cases} \end{aligned} \quad (8)$$

где  $rl(t)$  – прогнозный коэффициент характера замираний амплитуды принимаемого радиосигнала;

$t^{(1)}$  – временные участки передачи ТМИ, соответствующие временному промежутку начального входа объекта телеконтроля в ЗРВ и окончному участку выхода из ЗРВ, когда угол места примерно равен 7 градусам и ниже, а также временным участкам, соответствующим времени движения ЛА на предельно низкой высоте, а также на высокой скорости в слое ионизации;

$t^{(2)}$  – временные участки передачи ТМИ, соответствующие временным промежуткам этапов входа и выхода объекта телеконтроля в (из) ЗРВ, когда угол

места относительно приемных средств незначительно превышает 7 градусов, а также для временных участков, соответствующих временному промежутку отделения конструктивных элементов, возникновения различных вибрационных процессов на этапе активного участка траектории полета ЛА;

$t^{(3)}$  – временные участки передачи ТМИ, соответствующие временному промежутку этапа активного участка траектории полета ЛА.

Реальные текущие значения временных промежутков  $t^{(1)}$ ,  $t^{(2)}$ ,  $t^{(3)}$  определяются посредством эмпирически-аналитического расчета по имеющейся априорной информации о циклограмме полета ЛА, размещении наземных приемно-регистрирующих средств, статистики искажений и потерь ТМИ по аналогичным типам ЛА.

Таким образом, выражение (8) описывает аналитическую прогнозно-временную модель радиоканала передачи ТМИ в условиях замираний амплитуды принимаемого сигнала.

### Заключение

Применение аналитической прогнозно-временной модели радиоканала передачи ТМИ в условиях замираний амплитуды принимаемого сигнала позволит учесть новые аспекты моделирования при разработке перспективных помехоустойчивых методов приема ТМИ, а также сложных итерационных методов её последующей обработки, что в итоге позволит обеспечить высокую надежность регистрации результатов телеконтроля и достоверность подтверждения заданных летно-технических характеристик и оценивания технического состояния ЛА.

### Литература

1. Лоскутов А. И. Телеметрия / А. И. Лоскутов, А. А. Бянкин, Г. И. Козырев [и др.]. – Санкт-Петербург : ВКА имени А. Ф. Можайского, 2016. – 343 с.
2. Горелов В. А. Особенности фотоионизации около высокоскоростных летательных аппаратов / В. А. Горелов, А. Ю. Киреев, В. В. Шведченко // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. – Москва, 2011. – С. 1 – 16.
3. Ермолаев В. Т. Теоретические основы обработки сигналов в системах мобильной радиосвязи / В. Т. Ермолаев. – Нижний Новгород, 2010. – 107 с.
4. Гуткин Л. С. Теория оптимальных методов приема при флуктуационных помехах / Л. С. Гуткин. – Москва : Государственное энергетическое издательство, 1961. – 488 с.
5. Власов И. Б. Глобальные навигационные спутниковые системы / И. Б. Власов. – Москва : Издательство МГТУ имени Н. Э. Баумана, 2008. – 182 с.
6. Артюшкин А. Б. Наземные приемно-регистрирующие станции нового поколения / А. Б. Артюшкин, А. А. Бянкин.

кин, А. И. Лоскутов [и др.]. – Санкт-Петербург : ВКА имени А. Ф. Можайского, 2015. – 57 с.

7. Стукач О. В. Программный комплекс STATISTICA в решении задач управления качеством / О. В. Стукач. – Томск : Издательство Томского политехнического университета, 2011. – 163 с.

8. Ван Трис Г. Теория обнаружения, оценок и модуляции. В 4 томах. Том 1 / Под ред. проф. В. И. Тихонова ; пер. с англ. – Москва : Советское Радио, 1972. – 744 с.

9. Пашинцев В. П. Методика оценки вероятности правиль-

ного обнаружения сигналов с райсовскими замираниями / В. П. Пашинцев, А. В. Ляхов, А. Д. Белов [и др.] // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – Москва, 2012. – № 3. – С. 21 – 26.

10. Функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядков (таблица) // Infotables.ru : [сайт]. – 2014 – 2023. – URL : <https://infotables.ru/matematika/777-funktsii-besselya> (дата обращения: 23.05.2022).

11. Рекомендация МСЭ-R P.1057-2. Распределения вероятностей, касающихся моделирования распространения радиоволн. – [1994-2001-2007]. – 18 с.

Поступила в редакцию 06.10.2022

*Артём Сергеевич Дуников, главный инженер, т. 8 (950) 034-87-80, e-mail: artem.sever1@yandex.ru. (МИРЭА – Российский технологический университет).*

## ANALYTICAL FORECAST-TIME MODEL OF THE RADIO CHANNEL FOR THE TRANSMISSION OF TELEMETRY INFORMATION FROM THE AIRCRAFT

**A. S. Dunikov**

*The complication of on-board radio-electronic equipment of aircraft (LA) leads to the need to tighten the requirements for the completeness of control of its functioning, carried out by analyzing telemetric information (TMI) transmitted from their board during flight tests (LI). The process of developing new approaches for receiving and processing TMI, which can provide high reliability of the recorded information, should take into account the features of radio signal transmission in an external disturbing environment. The article synthesizes an analytical time-predictive model of the TMI radio transmission channel, taking into account the processes of occurrence of fluctuations in the amplitude of the received signal in different parts of the aircraft flight path. The use of an analytical predictive-temporal model of the TMI radio transmission channel will make it possible to justify the development of new methods for receiving and processing information that takes into account the occurrence of signal amplitude fluctuations.*

**Keywords:** Distribution law, technical condition control, flight tests, aircraft, radio channel, statistical data, telemetry information, signal amplitude fluctuations.

### References

1. Loskutov A. I. Telemetry / A. I. Loskutov, A. A. Byankin, G. I. Kozyrev [et al.]. – Saint-Petersburg : Military Space Academy named after A. F. Mozhaysky, 2016. – 343 p.
2. Gorelov V. A. Features of photoionization near high-speed aircraft / V. A. Gorelov, A. Yu. Kireyev, V. V. Shvedchenko // Physical and chemical kinetics in gas dynamics. – Moscow, 2011. – P. 1 – 16.
3. Yermolayev V. T. Theoretical basis of signal processing in mobile radio communication systems / V. T. Yermolayev. – Nizhny Novgorod, 2010. – 107 p.
4. Gutkin L. S. Theory of optimal reception methods at fluctuation noise / L. S. Gutkin. – Moscow : State energy publishing house, 1961. – 488 p.
5. Vlasov I. B. Global navigation satellite systems / I. B. Vlasov. – Moscow : Publishing house of Bauman Moscow State Technical University, 2008. – 182 p.
6. Artyushkin A. B. New-generation ground receiving and recording stations / A. B. Artyushkin, A. A. Byankin, A. I. Loskutov [et al.]. – Saint-Petersburg : Military Space Academy named after A. F. Mozhaysky, 2015. – 57 p.
7. Stukach O. V. STATISTICA software package for implementation of quality control tasks / O. V. Stukach. – Tomsk : Publishing house of Tomsk Polytechnic University, 2011. – 163 p.
8. Van Trees H. Detection, Estimation, and Modulation Theory. In 4 volumes. Volume 1 / Edited by Prof. V. I. Tikhonova ; translated from English. – Moscow : Soviet Radio, 1972. – 744 p.
9. Pashintsev V. P. Methods for assessment of probability of correct detection of signals with Rician fading / V. P. Pashintsev, A. V. Lyakhov, A. D. Belov [et al.] // Radio and telecommunication systems. – Moscow, 2012. – No. 3. – P. 21 – 26.
10. Zero-order and first-order Bessel functions of the first kind (table) // Infotables.ru : [website]. – 2014 – 2023. – URL : <https://infotables.ru/matematika/777-funktsii-besselya> (date of access: 23.05.2022).
11. Recommendation ITU-R P.1057-2. Probability distributions relevant to radiowave propagation modelling. – [1994-2001-2007]. – 18 p.

*Artem Sergeevich Dunikov, Chief Engineer, tel.: +7 (950) 034-87-80, e-mail: artem.sever1@yandex.ru. (MIREA – Russian Technological University).*