

18. Зельманов С.С. Обобщение понятия частотного резонанса на поведенческую модель линейной динамической системы с внешним описанием // Т-Comm (Телекоммуникации и транспорт). – 2012. – № 5.
19. Зельманов С.С. Резонанс в линейной стационарной динамической системе с входами и  $n$  одним выходом // Т-Comm (Телекоммуникации и транспорт). – 2013. – № 1.
20. Зельманов С.С. Матричный резонанс формы // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. – 2011. – № 4 (91).
21. Зельманов С.С. Многопараметрический резонанс в линейных стационарных динамических системах с управляемым затуханием // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 5 (142). – С.40–45.
22. Зельманов С.С. Матричный резонанс в диффузной системе с распределенными параметрами // Т-Comm (Телекоммуникации и транспорт). – 2013. – № 3. – С. 48–50.
23. Будак Б.М., Самарский А.А., Тихонов А.Н. Сборник задач по математической физике. – М.: Наука, 1972.
24. Бутковский А.Г. Характеристики систем с распределенными параметрами. Справочное пособие. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. – 495 с.
25. Весницкий А.И., Потапов А.И. Теория колебаний распределенных параметрических систем. Учебное пособие. – Горький, ГГУ, 1980.
26. Весницкий А.И. Волновые процессы в нестационарных упругих системах: ИЛ РГБ ОД 71: 85-1/180.
27. Зельманов С.С., Крылов В.В. О роли резонанса формы при диагностике состояния систем и конструкций // Т-Comm (Телекоммуникации и транспорт). – 2014. – № 5.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н. М.Ю. Звездина.

**Зельманов Самуил Соломонович** – Волго-Вятский филиала МТУСИ; e-mail: zelmanss@yandex.ru; 603011, Нижний Новгород, ул. Менделеева, 15; тел.: 8312457505; к.т.н.; доцент.

**Крылов Владимир Владимирович** – Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева; e-mail: vkrylov@heterarchica.com; 603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24; тел.: 8312578669; д.т.н.; профессор.

**Zelmanov Samuil Solomonovitch** – Moscow Technical University of Communication and Informatics, (Volgo-Vyatskiy Branch); e-mail: zelmanss@yandex.ru; 15, Mendeleeva street, Nizhny Novgorod, 603011, Russia; phone: +7312457505; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Krylov Vladimir Vladimirovich** – Nizhny Novgorod State Technical University; e-mail: vkrylov@heterarchica.com; 24, Mimina street, Nizhny Novgorod, 603950, Russia; phone: 78312578669; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 62.50:621.519

**А.П. Самойленко, А.И. Панычев, С.А. Панычев**

#### **МЕТОД ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ КОМПЛЕКСА РАДИОЭЛЕКТРОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА**

*Известный метод определения вероятности безотказной работы по результатам испытаний партии радиоэлектронного оборудования нередко не позволяет получить приемлемую точность из-за ограниченного объема однотипных испытуемых образцов. Дополнение результатов испытаний априорной информацией о характеристиках надежности комплекса при решении практических задач дает только точечную оценку искомой вероятности. Показано, что расчет надежности объектов с ограниченным объемом натурных испытаний может быть дополнен методикой оценки вероятности безотказной работы и времени безотказной работы, а также оценкой параметров закона распределения времени безотказной*

работы с учетом априорной информации об оцениваемых параметрах надежности комплекса радиоэлектронного оборудования летательного аппарата. Получено доказательство гипотезы, что апостериорная оценка вероятности безотказной работы комплекса точнее опытной оценки. Приведены расчетные формулы для апостериорных оценок вероятности безотказной работы и времени безотказной работы, для значения оценки математического ожидания выходного сигнала комплекса оборудования и ее дисперсии. На основе байесовского подхода к оцениванию неизвестных характеристик показано, что апостериорная плотность распределения оценки математического ожидания сигнала на выходе радиоэлектронного оборудования летательного аппарата совпадает с плотностью нормального закона распределения. Сделан вывод, что расчет надежности объектов с ограничением объема натурных испытаний может быть дополнен методикой оценки вероятности безотказной работы и времени безотказной работы, а также оценкой параметров закона распределения времени безотказной работы с учетом априорной информации об оцениваемых параметрах надежности комплекса радиоэлектронного оборудования летательного аппарата.

Надежность; вероятность безотказной работы; время безотказной работы; априорные данные; апостериорные данные; радиоэлектронное оборудование; летательный аппарат.

**A.P. Samoilenko, A.I. Panychev, S.A. Panychev**

### **METHOD FOR ASSESSING THE RELIABILITY OF COMPLEX ELECTRONIC EQUIPMENT AIRCRAFT**

*A known method for determining the probability of the results of the batch test of electronic equipment often does not allow to obtain acceptable accuracy due to the limited volume of similar test specimens. The addition of the results of the tests of a priori information about the characteristics of the reliability of the complex in the solution of practical problems gives only a point estimate of the desired probability. It is shown that the calculation of reliability of objects with a limited amount of full-scale tests may be supplemented by the method of estimating the probability of failure-free operation and uptime, as well as evaluating the parameters of the distribution law uptime taking into account a priori information about the estimated parameters, the reliability of the complex avionics of the aircraft. Received the proof of the hypothesis that the a posteriori estimation of probability of failure-free operation of the rather complex experimental evaluation. Calculation formulas for the a posteriori estimates of the probability of failure-free operation and uptime, for the value of the estimate of the expectation of the output signal of the complex equipment and its variance. A Bayesian approach to estimating the unknown characteristics is shown that the a posteriori density distribution of the estimate of the expectation of the signal at the output of the radio-electronic equipment of the aircraft coincides with the density of the normal distribution. It is concluded that the calculation of reliability of objects limiting the size of full-scale tests may be supplemented by the method of estimating the probability of failure-free operation and uptime, as well as evaluating the parameters of the distribution law uptime taking into account a priori information about the estimated parameters, the reliability of the complex avionics of the aircraft.*

*Reliability; probability of failure; uptime; a priori data; a posteriori data; avionics; aircraft.*

**Введение.** Известен метод определения вероятности безотказной работы радиоэлектронного оборудования летательных аппаратов (ЛА) по результатам испытаний нескольких однотипных объектов [1–26]:

$$P_0 = \frac{n_0}{N_0}, \quad (1)$$

где  $n_0$  – число исправных образцов к моменту окончания испытаний;  $N_0$  – общее число опытных образцов.

Недостатком такого подхода является низкая точность оценки вероятности безотказной работы из-за ограниченного объема испытываемых образцов вследствие их высокой стоимости и невозможности учета априорной информации о характеристиках надежности исследуемого объекта, приобретенных по результатам научных исследований.

Известны работы, посвященные методике определения вероятности безотказной работы путем совместной обработки результатов испытаний опытных образцов и априорной информации о характеристиках надежности объекта, полученной до проведения испытаний [7]. Однако такие методы учета априорной информации не получили широко распространения для решения практических задач, поскольку их использование предполагает знание не только априорной оценки вероятности безотказной работы, но и ее дисперсии. В большинстве случаев, встречающихся на практике, по результатам априорного исследования объекта может быть получена лишь точечная оценка этой вероятности [7]. Для определения дисперсии априорной оценки используются различные эвристические конструкции, что вносит дополнительную неопределенность и является главной причиной ограничения прикладного значения рассматриваемых методов.

Отсутствие в технической и патентной литературе сведений по разработке эффективного метода определяет новизну этой работы.

**Основная часть.** Рассмотрим комплекс радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) летательного аппарата, для которого по результатам испытаний образцов получена оценка вероятности безотказной работы  $P_0$ . Считаем, что также известна априорная оценка  $P_p$  этой вероятности.

Необходимо найти апостериорную оценку вероятности безотказной работы  $P_a$  с учетом априорной информации.

В качестве апостериорной рассмотрим оценку  $\hat{p}$ , полученную методом максимального правдоподобия по статистической выборке объема

$$N = N_0 + N_p, \quad (2)$$

где  $N_p$  – неизвестное число гипотетических испытаний, соответствующее  $P_p$ .

Если однородность и независимость испытаний обеспечены, тогда вероятность того, что к моменту окончания испытаний из  $N$  объектов исправно ровно  $n$  определяется выражением

$$P(n) = C_N^n P^n (1-P)^{N-n}. \quad (3)$$

Представим функцию правдоподобия [2] выражение (3) в виде

$$L(P, \hat{p}) = C_N^n P^{n\hat{p}} (1-P)^{N(1-\hat{p})} \quad (4)$$

и предложим статистические гипотезы

$$H_0 : P = P_0; \quad H_p : P = P_p.$$

Отношения правдоподобия для проверки гипотез  $H_0$  и  $H_p$  согласно (4) определяются выражениями

$$\theta_0 = \frac{P_0^{N\hat{p}} (1-P_0)^{N(1-\hat{p})}}{\hat{p}^{N\hat{p}} (1-\hat{p})^{N(1-\hat{p})}}; \quad \theta_p = \frac{P_p^{N\hat{p}} (1-P_p)^{N(1-\hat{p})}}{\hat{p}^{N\hat{p}} (1-\hat{p})^{N(1-\hat{p})}}.$$

Поскольку апостериорная оценка  $P_a$ , с одной стороны, должна быть близка к оценке по результатам испытаний  $P_0$ , а с другой – к априорной оценке  $P_p$ , то ее следует выбрать в виде

$$P_a = \arg \max_{\hat{p}} \theta_0 \theta_p = \arg \max_{\hat{p}} \ln(\theta_0 \theta_p).$$

Используя необходимое условие максимума функции, получаем уравнение

$$\frac{\partial \ln(\theta_0 \theta_p)}{\partial \hat{p}} = N \left[ \ln(P_0 P_p) - \ln((1-P_0)(1-P_p)) - 2 \ln(P_a) + 2 \ln(1-P_a) \right] = 0. \quad (5)$$

Решением уравнения (5) является

$$P_a = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{(1-P_0)(1-P_p)}{P_0} - P_p}}. \quad (6)$$

Покажем, что полученная апостериорная оценка вероятности безотказной работы  $P_a$  точнее оценки этой вероятности по результатам испытаний  $P_0$ .

Для этого найдем закон распределения апостериорной оценки  $\hat{p}$ .

Представим функцию правдоподобия (4) следующим образом:

$$L(P, \hat{p}) = P(P = \hat{p})C_1(\hat{p})C_2(P), \quad (7)$$

$$L(P, \hat{p}) = \varphi_{\hat{p}}(P, \hat{p})C_1(\hat{p}), \quad (8)$$

где  $C_1(p)$  и  $C_2(p)$  – некоторые функции;  $P(P = \hat{p})$  – вероятность того, что вероятность безотказной работы равна оценке  $\hat{p}$ ;  $\varphi_{\hat{p}}(P, \hat{p})$  – функция вероятности  $P$ , удовлетворяющая свойствам плотности вероятности.

Тогда из уравнений (7) и (8) находим

$$C_1(\hat{p}) = \int_{\omega_p} \varphi_{\hat{p}}(P, \hat{p}) dP,$$

где  $\omega_p = [0, 1]$ ;

$$C_2(P) = \sum_{\hat{p} \in \Omega_p} \frac{L(P, \hat{p})}{C_1(\hat{p})},$$

где  $\Omega_p = \left\{0, \frac{1}{N}, \frac{2}{N}, \dots, 1\right\}$ .

Учитывая выражение (4), оценим функции

$$C_1(\hat{p}) = C_N^n \beta(N\hat{p} + 1, N(1 - \hat{p}) + 1);$$

$$C_2(P) = N + 1,$$

где  $\beta(N\hat{p} + 1, N(1 - \hat{p}) + 1)$  – бета-функция.

Подставляя эти функции в уравнение (7) и решая его относительно  $P(P = \hat{p})$ , находим закон распределения апостериорной оценки  $\hat{p}$ :

$$P(P = \hat{p}) = C_N^{N\hat{p}} P^{N\hat{p}} (1 - P)^{N(1 - \hat{p})}.$$

Зная закон распределения, получаем математическое ожидание и дисперсию оценки  $\hat{p}$  по известным формулам:

$$M[\hat{p}] = P; \quad D[\hat{p}] = \frac{P(1 - P)}{N}.$$

Поскольку точное значение вероятности не известно, то используя ее апостериорную оценку, получаем следующие приближенные оценочные выражения

$$M[\hat{p}] = P_a; \quad D[\hat{p}] = \frac{P_a(1 - P_a)}{N}.$$

Известно, что дисперсия оценки  $P_0$  может быть представлена как

$$D[P_0] \cong \frac{P_0(1 - P_0)}{N_0}.$$

Тогда отношение дисперсий равно

$$\delta = \frac{D[1 - P_p]}{D[\hat{p}]} = \frac{P_0(1 - P_0)(N_0 + N_p)}{P_a(1 - P_a)N_0}. \quad (9)$$

Учитывая, что значения  $P_0$  и  $P_a$  близки, из (9) с приближением получим

$$\delta \cong 1 + \frac{N_p}{N_0}.$$

Значит, отношение дисперсий  $\delta > 1$ , и из выражения (9) следует, что дисперсия оценки по результатам испытаний  $P_0$  больше дисперсии апостериорной оценки  $\hat{p}$ :

$$D[P_0] > D[\hat{p}],$$

то есть апостериорная оценка точнее опытной оценки вероятности безотказной работы [27].

Таким образом, при означенных условиях вероятность безотказной работы комплекса РЭА летательного аппарата с учетом апостериорной информации  $P_p$  и результатов натурных испытаний  $P_0$  определяется как

$$P_a = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{(1-P_0)(1-P_p)}{P_0} - P_p}}. \quad (10)$$

Определим значение апостериорной оценки среднего времени безотказной работы, учитывающей результаты натурных испытаний и надежностных расчетов.

Полагая, что плотность распределения времени безотказной работы

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}, \quad (11)$$

где  $\lambda = \frac{1}{T}$  – интенсивность отказов;  $T$  – среднее время безотказной работы; можно определить все характеристики надежности комплекса РЭА, считая их значения предельно низкими относительно других распределений.

Считаем, что проведены натурные испытания над  $N_0$  образцами и время безотказной работы  $i$ -го образца оценено величиной  $t_i$ , тогда оценка среднего времени до отказа испытуемого комплекса РЭА ЛА определяется как [3]

$$T_0^* = \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} t_i.$$

Полагаем, что результатом надежностных расчетов, проведенных до испытаний, явилась априорная оценка времени безотказной работы  $T_p$ , которая будет использована в дальнейшем анализе.

Предположим, что существует оценка  $\hat{T}$  среднего времени до отказа, полученная методом максимального правдоподобия по выборке из  $N$  ( $N > N_0$ ) образцов с той же плотностью распределения

$$\hat{T} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i. \quad (12)$$

Конструкция функции правдоподобия может быть представлена как [2]

$$L(T) = \prod_{i=1}^N \lambda e^{-\lambda t_i}.$$

Рассмотрим статистические гипотезы о равенстве среднего времени до отказа комплекса радиоэлектронного оборудования летательного аппарата  $T$  соответственно оценками  $T_0$  и  $T_p$ . Отношения функций правдоподобия для проверки этих гипотез имеют вид соответственно

$$v_0 = \frac{L(T_0)}{L(\hat{T})} = \left( \frac{\hat{T}}{T_0} \right)^N \exp\left( -\frac{NT}{T_0} + N \right)$$

и

$$v_p = \frac{L(T_p)}{L(\hat{T})} = \left( \frac{\hat{T}}{T_p} \right)^N \exp\left( -\frac{N\hat{T}}{T_p} + N \right).$$

Так как апостериорная оценка  $T_a$  среднего времени безотказной работы РЭА ЛА, с одной стороны, должна быть близка к априорной оценке  $T_p$ , а с другой стороны – к оценке по результатам испытаний  $T_0$ , то в качестве апостериорной оценки возьмем такое значение, которое бы обеспечивало максимум функции

$$I_1 = v_0 v_p$$

или, что эквивалентно,

$$I = \ln(v_0 v_p).$$

Тогда

$$T_a = \arg \max_T I = \arg \max_T \ln(v_0 v_p),$$

и апостериорная оценка среднего времени безотказной работы РЭА ЛА может быть найдена из уравнения, аналогичного (5), в следующем виде:

$$T_a = \frac{2T_p T_0}{T_p + T_0}.$$

Надежность радиоэлектронного оборудования летательного аппарата может быть оценена также посредством оценки параметров закона распределения выходных сигналов, подверженных воздействию случайных возмущений, вызванных нестабильностью характеристик его функционирования.

Пусть в результате исследования комплекса РЭА ЛА как динамической системы найдены расчетные оценки математического ожидания  $M_p$  и дисперсии  $D_p$  выходного сигнала, а по результатам стендовых испытаний  $N_0$  образцов комплекса получены реальные оценки этих параметров –  $M_0$  и  $D_0$ .

Полагая, что расчетные оценки  $M_p$  и  $D_p$  получены по результатам  $N_p$  гипотетических испытаний этого комплекса и считая, что выходной сигнал комплекса  $x(t)$  описывается нормальным законом распределения с числовыми характеристиками математического ожидания  $M$  и дисперсии  $D$ , получим следующие модели законов распределения оценок математического ожидания  $M_p$  и  $M_0$ :

$$M_p \cong N\left( M_p, \frac{D_p}{N_p} \right),$$

$$M_0 \cong N\left( M_0, \frac{D_0}{N_0} \right).$$

Используя байесовский подход к оцениванию неизвестных характеристик, получим апостериорный закон распределения оценки математического ожидания выходного сигнала системы и соответствующую апостериорную оценку этой характеристики.

В соответствии с формулой Байеса получим плотность распределения оценки математического ожидания в виде

$$f(M) = \frac{\exp\left\{-0,5\left[\frac{N_p}{D_p}(M - M_p)^2 + \frac{N_0}{D_0}(M - M_0)^2\right]\right\}}{\int_{-\infty}^{\infty} \exp\left\{-0,5\left[\frac{N_p}{D_p}(M - M_p)^2 + \frac{N_0}{D_0}(M - M_0)^2\right]\right\}dM}.$$

Проведя преобразование в показателях экспонент и сокращение постоянных множителей в числителе и знаменателе дроби, а также введя новые обозначения, получим значение дисперсии оценки математического ожидания и значение математического ожидания:

$$D[M] = \frac{D_p D_0}{N_p D + N_0 D_p},$$

$$M^* = \frac{N_p D[M^*] M_p}{D_p} + \frac{N_0 D[M^*] M_0}{D_0}.$$

Найдем апостериорную плотность распределения оценки математического ожидания

$$f(M) = \frac{\exp\left\{-0,5\frac{(M - M^*)^2}{D[M^*]}\right\}}{\int_{-\infty}^{\infty} \exp\left\{-0,5\frac{(M - M^*)^2}{D[M^*]}\right\}dM}.$$

Очевидно, что апостериорная плотность распределения совпадает с плотностью нормального закона распределения  $N(M^*, D[M^*])$ . Апостериорная оценка математического ожидания выходного сигнала системы определяется формулой

$$M^* = \frac{N_p D[M^*] M_p}{D_p} + \frac{N_0 D[M^*] M_0}{D_0},$$

а его дисперсия равна

$$D[M^*] = \frac{D_p D_0}{N_p D + N_0 D_p}.$$

**Заключение.** Из вышеизложенного можно сделать вывод, что расчет надежности объектов с ограничением объема натурных испытаний может быть дополнен методикой оценки вероятности безотказной работы и времени безотказной работы, а также оценкой параметров закона распределения времени безотказной работы с учетом априорной информации об оцениваемых параметрах надежности комплекса радиоэлектронного оборудования летательного аппарата.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Дмитриев Д.К., Мальцев П.А.* Основы теории построения и контроля сложных систем. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 192 с.
2. *Самойленко А.П.* Надежность, эргономика, качество автоматизированных систем обработки информации и управления. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2004. – 176 с.
3. *Самойленко А.П., Усенко О.А.* Модели оценки надежности аппаратно-программных комплексов радиотехнических и телекоммуникационных систем и сетей. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2008. – 125 с.
4. *Прохоренко В.А., Голиков В.Ф.* Учет априорной информации при оценке надежности. – Минск: Наука и техника, 1979. – 208 с.
5. *Львович Я.Е., Фролов В.Н.* Технологические основы конструирования, технологии и надежности РЭА. – М.: Радио и связь, 1986. – 192 с.

6. Гуляев В.А. Техническая диагностика управляющих систем. – Киев: Наукова Думка, 1983. – 208 с.
7. Росин М.Ф. и др. Статистическая диагностика и теория эффективности систем управления. – М.: Машиностроение, 1981. – 249 с.
8. Русанов В.Н., Сильянов Н.В., Киселёв А.Ю., Пряничников С.В. Самодиагностируемая резервированная бортовая вычислительная систем // Авиакосмическое приборостроение. – 2014. – № 2.
9. Дрогайцев В.С., Писарев В.Н., Говоренко Г.С. и др. Технология процесса комплексирования автоматизированных средств испытания бортовых систем летательных аппаратов // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2004. – № 3. – С. 53-76.
10. Петров В.М., Мороз Д.Ю. Методика анализа живучести сложных бортовых радиоэлектронных систем с учетом системы контроля // Надежность и качество: Труды Международного симпозиума. – 2006. – Т. 2. – С. 4-6.
11. Бакулин В.Н., Малков С.Ю., Гончаров В.В., Ковалев В.И. Управление обеспечением стойкости сложных технических систем. – М.: Физматлит, 2006. – 300 с.
12. Дрогайцев В.С., Куликов Р.Е. Подход к техническому диагностированию отказов бортовых систем управления летательных аппаратов в условиях влияния внешней среды // Авиакосмическое приборостроение. – 2014. – № 10. – С. 5-13.
13. Longden L. et al Designing a Single Board Computers for Space Using the Most Advanced Processor and Mitigation Technologies // Proceedings of the European Space Components Conference/ European Space Agency. – Toulouse, France, 2002. – P. 313-316.
14. Czajkowski D.R., Strobel D.S. Li E. Radiation Hardened , High Performance Image Processing System for New Responsive Space Missions // Proceedings of the AIAA SPACE 2009 Conference & Exposition. American Institute of Aeronautics and Astronautics. – USA, 2009. – P. 153-160.
15. Wah B.W. Wiley Encyclopedia of Computer Science And Engineering. – 2008, Vol. 1/ Wiley-Interscience. – P. 17-19.
16. Диллон Б., Сингх Ч. Инженерные методы обеспечения надежности систем. – М.: Мир, 1984. – 380 с.
17. Hahn M., Elsner G. Advanced Integrated Control and Data Systems for Constellation Satellites // MAPLD International Conference. NASA Office of Logic Design, Washington. – USA, 2002. – P. 217-225.
18. Borgelt C. Prototype-based Classification and Clustering Habilitation Thesis. – Magdeburg: Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2009. – 350 p.
19. Russel Stuart J., Norvig Peter. Artificial Intelligence: A Modern Approach (3<sup>rd</sup> Ed.). – New Jersey: Publishing House «Prentice Hall», 2010. – 1152 p.
20. Shelton C., Koopman P., Nace W. A Framework for Scalable Analysis and Design of System-Wide Graceful Degradation in Distributed Embedded Systems // Eighth IEEE International Workshop on Object-Oriented Real-Time Dependable Systems (WORDS 2003): Guadelajare (Mexico), Jan. 2003. – Guadelajare, 2003. – P. 8.
21. Brockwell P.J., Davis R.A. Introduction to Time Series and Forecasting Springer Text in Statistics. – N.Y.: Springer-Verlag, 2002. – 350 p.
22. Friendman J.H. Stochastic Gradient Boosting // Comput. Statist. Data Anal. – 2002, Vol. 38. – P. 367-378.
23. Самойленко А.П. Надежность автоматизированных систем сбора, обработки информации и управления. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000.
24. Гузик В.Ф., Самойленко А.П., Паньчев С.А. Обоснование актуальности и проблемности решения задачи отказоустойчивости бортовых вычислительных комплексов космического применения // Практика и перспективы развития партнерства в сфере высшей школы: Материалы X Междунар. научн.-практ. семинара (Донецк, 4-7 мая 2009 г.). В 2-х т. Т. 1. – Донецк, 2009. – С. 207-214.
25. Согомонян Е.С., Слабаков Е.В. Самопроверяемые устройства и отказоустойчивые системы. – М.: Радио и связь, 1989.
26. Согомонян Е.С., Пархоменко П.П. Основы технической диагностики. – М.: Энергоиздат, 1981.
27. Арсентьев В.Н. Статистический анализатор // Патент России № 2015554. GU06F 15/36. 1994. Бюл. № 12.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.В. Тютиков.



**Самойленко Анатолий Петрович** – Южный федеральный университет; e-mail: rts@tgn.sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: +78634371637; кафедра радиотехнических и телекоммуникационных систем; доцент.

**Панычев Сергей Андреевич** – e-mail: gvf@dce.sfedu.ru; кафедра вычислительной техники; аспирант.

**Панычев Андрей Иванович** – e-mail: ruu2011@mail.ru; тел.: +78634371733; кафедра антенн и радиопередающих устройств; доцент.

**Samojlenko Anatoly Petrovich** – Southern Federal University; e-mail: rts@tgn.sfedu.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371637; the department of radio engineering and telecommunication systems, associate professor.

**Panychev Sergey Andreevich** – e-mail: gvf@dce.sfedu.ru; the department of computer engineering; postgraduate student.

**Panychev Andrey Ivanovich** – e-mail: ruu2011@mail.ru; phone: +78634371733; the department of antennas and radio transmitters; associate professor.

УДК 519.688

**А.В. Комар**

### **МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕЛЬЕФА МЕСТНОСТИ С ПРИМЕНЕНИЕМ КАРТЫ ВЫСОТ**

*Рассмотрена проблема синтеза трехмерной модели рельефа местности. В ходе работы были проанализированы различные методы построения поверхности и способы увеличения степени детализации сцены. На основе проведенного исследования были выявлены проблемы, связанные с представлением входных данных, реализацией модели освещения и форматом хранения полученных данных. Для решения указанных проблем был предложен алгоритм построения рельефа местности с использованием карты высот, полученной из изображения, кодированного с помощью битовой карты. Данный метод позволяет создавать точные модели рельефа любого типа. При визуализации трехмерной сцены была применена модель освещения с учетом затухания сигнала в атмосфере. Для расчета затухания и внутреннего рассеяния был разработан пиксельный шейдер, в котором с помощью коррекции света сцены на значения затухания формируется результирующее освещение сцены. Особое внимание в исследовании уделено методам повышения качества, построенной модели рельефа. Для придания большей реалистичности отображаемому рельефу местности был использован механизм отображения неровностей. Этот механизм включает в себя применение текстур рельефа. Вывод неровностей осуществляет пиксельный шейдер, который сначала переносит вектор, характеризующий свет, в пространство текстуры вершинного шейдера, а затем рассчитывает скалярное произведение этого вектора с нормалью к поверхности, хранящейся в текстуре. Далее скалярное значение, рассчитанное для каждого пикселя, применяется для коррекции количества света, попадающего на тот или иной пиксел. Алгоритм был реализован на языке C++ с использованием графической библиотеки OpenGL и языка описания шейдеров GLSL.*

*Моделирование ландшафта; моделирование рельефа; полигональная сетка; карта высот.*

**A.V. Komar**

### **MODELLING OF TERRAIN USING A HEIGHT MAP**

*The article describes the problem of the synthesis of three-dimensional terrain model. During the analyzed various methods of building surfaces and ways to increase the level of detail of the scene. Based on the survey identified the problems associated with the representation of the input data,*