

УДК 681.518.5

В.Ф. Гузик, А.П. Самойленко, А.И. Панычев, С.А. Панычев  
**КРИТЕРИИ ЗНАЧИМОСТИ ВАРИАЦИЙ В СИГНАЛАХ ДАТЧИКОВ  
ВСТРОЕННОЙ СИСТЕМЫ ДОПУСКОВОГО КОНТРОЛЯ  
ЭЛЕКТРОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

*Южный федеральный университет, Таганрог, Россия*

*Рассмотрена встроенная система контроля и диагностики электронного оборудования. Показатели качества функционирования электронного устройства моделируются сложными временными функциями контролируемых параметров, которые отображают состояние функциональных узлов оборудования. Предложен комплексный критерий оценки значимости вариаций в сигналах датчиков функциональных контрольных точек контролируемого объекта. Решение о состоянии объекта контроля по результатам измерений его выходных характеристик принимается по совокупности двух критериев – уровневого и информационного. Уровневая оценка значимости параметра характеризует величину выбросов выходного сигнала и сконструирована на основе отношения правдоподобия в соответствии с критерием минимума вероятности ошибочного решения. Информационный критерий основан на принципе максимума энтропии Джейнса и дает оценку количества информации, получаемой при измерении выходной характеристики объекта контроля. Получены оценки значимости вариаций контролируемого сигнала для наиболее употребительных в задачах надежности электронного оборудования законов распределения случайных величин.*

**Ключевые слова:** встроенная система, допусковый контроль, диагностика, случайный процесс, закон распределения случайной величины.

**Введение.** Для обеспечения заданных показателей отказоустойчивости электронного оборудования необходима собственная встроенная система контроля и диагностики, что позволяет рассматривать совокупную структуру «объект контроля – система контроля» (ОК–СК). Создание СК предусматривает выполнение взаимосвязанных этапов [1]: построение диагностической модели; выбор метода диагностирования; определение класса неисправностей, подлежащих обнаружению и поиску; выбор методов контроля и тестов; анализ результатов контроля; решение диагностической задачи.

Целью контроля объекта в процессе эксплуатации является принятие решения о его работоспособности по результатам измерения выходных характеристик, несущих информацию о параметрах состояния ОК. Процесс контроля включает этапы измерения выходных сигналов ОК и принятия решения о состоянии ОК по результатам измерений [2-9].

При использовании допускового контроля задача диагностики заключается в проверке принадлежности сигнала, отражающего совокупность значений контролируемых параметров, одному из непересекающихся подмножеств, соответствующих конкретным сбоям или

отказам [10-16].

**Постановка задачи и анализ.** Объектом контроля является электронное оборудование, показатели качества функционирования которого представляют собой сложные функции времени и функционалы  $x_i(t)$ ,  $i = \overline{1, N}$  контролируемых и управляемых параметров  $C_j$ ,  $j = \overline{1, M}$ . Эти параметры отображают состояние функциональных узлов оборудования. Таким образом, СК в процессе диагностирования ОК осуществляет контроль во времени выходных характеристик

$$\bar{x}(t) = \bar{F}(\bar{C}, t) \quad (1)$$

с заданной инструментальной достоверностью

$$D_i = \Phi_i[f_i(x_i), f_i(\delta_i), \Delta_i], \quad i = \overline{1, N},$$

где  $\bar{x}(t) = (x_1(t), x_2(t), \dots, x_N(t))$  – вектор выходных характеристик датчиков функциональных точек ОК, контролируемых СК;

$\bar{C} = (C_1, C_2, \dots, C_M)$  – вектор параметров ОК, влияющих на выходные характеристики;

$\Delta_i = \bar{x}_i - \underline{x}_i$  – размер допусковой области  $i$ -го выходного сигнала;

$\underline{x}_i$ ,  $\bar{x}_i$  – нижняя и верхняя границы допусковой области  $i$ -го выходного сигнала, определяемые соответствующими техническими условиями;

$f_i(x_i)$ ,  $f_i(\delta_i)$  – функции плотности распределения  $i$ -го выходного сигнала и погрешности измерения данной характеристики [17-20].

Используем следующие допущения:

- измеряемые выходные характеристики ОК являются аддитивной смесью истинного сигнала и ошибок измерителя;

- изменение во времени выходных характеристик ОК моделируется непрерывными случайными процессами;

- изменения во времени выходных сигналов ОК и измерителя независимы друг от друга;

- процесс измерения выходных сигналов оптимален по критерию минимума среднеквадратической погрешности;

- закон распределения погрешности измерения считается известным.

Контроль технического состояния ОК по выходным сигналам выполняется в два этапа:

- проводится измерение и оценка приращения выходного сигнала  $\Delta x_i$ ;

- если значение приращения  $\Delta x_i$  находится в пределах допуска, проводится оптимальная по критерию минимума среднеквадратической погрешности оценка параметров  $C_j$ ; в противном случае принимается решение о возникновении сбоя или отказа по одному из параметров и

выполняется процедура локализации и идентификации отказа.

Достоверность оценки параметров  $C_j$  определяется как вариациями параметров  $\Delta C_j$  относительно их номинальных значений  $C_{0j}$ , так и среднеквадратической погрешностью измерения  $\delta_m$  выходного сигнала.

Произведем количественную оценку значимости параметров ОК по интегральному критерию, объединяющему две составляющие:

- уровневую, характеризующую величину выбросов выходного сигнала; назовем эту составляющую  $L$ -критерием;

- информационную, характеризующую энтропию выходного сигнала; назовем ее  $I$ -критерием.

В качестве математического аппарата для решения поставленной задачи применяется аппарат теории вероятностей и статистических решений.

**Решение проблемы.** Оценкой значимости параметра по уровневому  $L$ -критерию является такое предельное соотношение  $\Delta x_i / \delta_m$  между вариацией сигнала  $\Delta x_i$  по параметру  $C_j$  и среднеквадратической погрешностью измерения  $\delta_m$ , при котором становится невозможной оптимальная процедура оценки величины приращения  $\Delta x_i$ .

Если процесс измерения сигнала  $x_i(t)$  оптимален по критерию минимума среднеквадратической погрешности, то значение измеряемой величины равно ее апостериорному математическому ожиданию  $m_{xi}$ . При допусковом контроле по известному значению  $m_{xi}$  и границам допуска  $\underline{x}_i$ ,  $\overline{x}_i$  необходимо с определенной вероятностью принять решение о нахождении выходной характеристики в пределах зоны допуска. Значение  $m_{xi}$  априори известно, примем его равным номинальному значению измеряемой характеристики  $x_{0i}$ :  $m_{xi} = x_{0i}$ .

Оптимальную процедуру оценки сигнала  $x_i(t)$  по критерию минимума вероятности ошибочного решения осуществим на основе отношения правдоподобия

$$Q(x_i) = \frac{P_1(x_i / \Delta_i)}{P_0(x_i / \Delta_i)}, \quad (2)$$

где  $P_1(x_i / \Delta_i)$  – апостериорная вероятность правильного решения, то есть гипотезы «характеристика в допуске» при условии, что она действительно в допусковой области  $\Delta_i$ :

$$\underline{x}_i \leq x_i(t) \leq \overline{x}_i, \quad (3)$$

$P_0(x_i / \Delta_i)$  – апостериорная вероятность ошибочного решения, то есть гипотезы «характеристика не в допуске» при истинном условии (3).

Если выполняется условие (3), вероятность  $P_0(x_i / \Delta_i)$  характеризует ошибку первого рода – риск изготовителя, если же выполняются условия  $x_i(t) < \underline{x}_i$  или  $x_i(t) > \bar{x}_i$ , вероятность  $P_1(x_i / \Delta_i)$  соответствует ошибке второго рода – риску заказчика.

Оптимальная процедура принятия решения на основе критерия максимального правдоподобия сводится к сравнению  $Q(x_i)$  с порогом, равным единице. Гипотеза «выходная характеристика в допуске» принимается, если

$$Q(x_i) > 1. \quad (4)$$

Гипотеза «характеристика не в допуске» принимается, если

$$Q(x_i) \leq 1. \quad (5)$$

Из (2) следует, что условие (5) будет выполняться, когда вероятность ошибочного решения превышает вероятность правильного решения:  $P_0(x_i / \Delta_i) > P_1(x_i / \Delta_i)$ . Если это отношение выполняется для всех  $\underline{x}_i \leq x_i(t) \leq \bar{x}_i$ , то контроль выходной характеристики теряет смысл, так как вне зависимости от измеренного значения всегда будет приниматься гипотеза «характеристика не в допуске».

Найдем предельное соотношение между приращением  $\Delta x_i$  и погрешностью измерения  $\delta_m$  на основании условий (3) и (5). Так как при оценке выходной характеристики возможны только две взаимоисключающие гипотезы, то выражение (2) примет вид

$$Q(x_i) = \frac{P_1(x_i / \Delta_i)}{1 - P_1(x_i / \Delta_i)}. \quad (6)$$

Условие (5) для (6) записывается в виде

$$P_1(x_i / \Delta_i) \leq 0,5. \quad (7)$$

Апостериорная вероятность нахождения  $i$ -ой выходной характеристики в зоне допуска  $P_1(x_i / \Delta_i)$  определяется интегрированием по полю допуска апостериорной плотности вероятности этого сигнала

$$P_1(x_i / \Delta_i) = \int_{\underline{x}_i}^{\bar{x}_i} f(x_i / \Delta_i) dx, \quad (8)$$

где  $f(x_i / \Delta_i)$  – апостериорная плотность вероятности выходной характеристики при условии наблюдения процесса  $x_i(t)$ , являющегося смесью истинного значения характеристики и ошибок измерения.

Искомая количественная оценка значимости параметра по  $L$ -критерию определяется в два этапа:

- замена в выражении (8) переменной интегрирования на относительную величину и переход к относительным границам поля допуска  $\underline{x}_i / \delta_m, \overline{x}_i / \delta_m$ ;

- использование условия (7) с целью его разрешения относительно предельного соотношения  $\Delta x_i / \delta_m$ , при котором становится невозможной оптимальная оценка величины приращения.

Количественной оценкой значимости параметра по информационному  $I$ -критерию в соответствии с принципом максимума энтропии Джейнса [20] является количество информации, получаемой при измерении выходной характеристики ОК  $x_i(t)$ , которое определяется соотношением

$$I(x_i, \Delta_i) = H(x_i) - H(x_i, \Delta_i). \quad (9)$$

В (9) величина  $H(x_i)$  является дифференциальной энтропией выходной характеристики ОК:

$$H(x_i) = - \int_{-\infty}^{\infty} f(x_i) \log_2 f(x_i) dx, \quad (10)$$

где  $f(x_i)$  – априорная плотность вероятности сигнала  $x_i(t)$ .

Величина  $H(x_i, \Delta_i)$  представляет собой условную дифференциальную энтропию, выражающую количество информации, полученной измерителем при условии положения выходной характеристики  $x_i(t)$  в поле допуска  $\Delta_i$ :

$$H(x_i, \Delta_i) = - \int_{\underline{x}_i}^{\overline{x}_i} f(x_i / \Delta_i) \log_2 f(x_i / \Delta_i) dx. \quad (11)$$

Нормированное значение количества информации при измерении  $i$ -й выходной характеристики равно

$$I(x_i, \Delta_i) = \frac{H(x_i) - H(x_i, \Delta_i)}{H(x_i)} = 1 - \frac{H(x_i, \Delta_i)}{H(x_i)}. \quad (12)$$

Искомая количественная оценка значимости параметра по  $I$ -

критерию определяется в два этапа:

- замена в выражении (11) переменной интегрирования на относительную величину и переход к относительным границам поля допуска  $\underline{x}_i / \delta_m, \overline{x}_i / \delta_m$ ;

- использование выражения (12) для вычисления измеренного количества информации как функции относительного приращения выходной характеристики  $\Delta x_i / \delta_u$  по параметру  $C_j$ .

Интегральный критерий значимости вариаций выходного сигнала ОК формируется на основе интегрально-аддитивной методологии комплексирования априорных оценок значимости  $L$ -критерия и  $I$ -критерия:

$$V_i = b_{Li} \frac{\Delta x_i}{\delta_u} + b_{Ii} I(x_i, \Delta_i), \quad (2.13)$$

где  $b_{Li}, b_{Ii}$  – экспертные весовые коэффициенты, выбираемые из условия  $b_{Li} + b_{Ii} = 1$  и устанавливаемые в соответствии с техническими условиями на показатели качества функционирования конкретного вида ОК.

**Обсуждение результатов.** В таблице 1 приведены рассчитанные по (7), (8) предельные соотношения между приращением выходного сигнала и погрешностью измерения ( $L$ -критерии) и рассчитанное по (11), (12) относительное количество получаемой информации при предельном отношении вариации сигнала и погрешности измерителя с СКО  $\delta_m = 1$  ( $I$ -критерии) для наиболее распространенных законов распределения погрешности измерения.

Полученные предельные соотношения можно использовать в качестве количественных  $L$ -критериев для оценки значимости параметров при известной зависимости вариации входного сигнала от рассмотренных статистических характеристик его определяющих параметров. Соответствующие им количества извлекаемой измерительным прибором информации можно использовать как количественные  $I$ -критерии для оценки значимости параметров.

Как следует из таблицы 1, полученные значения  $L$ -критерия хорошо согласуются с  $t$ -критерием Стьюдента, применяемым в математической статистике для определения доверительных интервалов [17]. Так, условию (7), примененному ко всем рассмотренным законам распределения, на основании таблицы доверительных вероятностей [19]

$$\beta = 2 \int_0^{t_\beta} S_{n-1}(t) dt$$

при числе степеней свободы  $n-1 = \infty$  соответствует уровень значимости, равный 0,5. Вместе с этим, полученные значения  $L$ -критерия во всех случаях, кроме треугольного распределения, имеют не меньшую величину. Таким образом, критерий (7) дает более жесткую оценку значимости параметра в сравнении с пяти- или десятипроцентным уровнем значимости, применяемым в математической статистике.

Таблица 1 – Значения уровневых  $L$ -критериев и информационных  $I$ -критериев

Закон распределения погрешности	$L$ -критерий	$I$ -критерий
Равномерный	0,866	0,5
Релея	0,242	0,886
Нормальный	0,675	0,881
Вейбулла ( параметр $k=1$ )	0,636	0,866
Экспоненциальный	0,636	0,866
Лапласа	0,49	0,757
Симпсона	0,359	0,746
Райса ( $\nu/\sigma \geq 3$ )	0,675	0,881
Парето ( $k=3$ )	0,404	0,708
Парето ( $k \rightarrow \infty$ )	0,636	0,656
Степенное ( $c=1$ )	0,866	1,0
Степенное ( $c=2$ )	0,795	0,75
Степенное ( $c=3$ )	0,755	0,988
Степенное ( $c \rightarrow \infty$ )	0,636	0,558
Экстремального (минимального) значения	0,637	0,845
Экстремального (максимального) значения ( $a=1, b=0,5$ )	0,756	0,819
Логнормальное ( $\log_2$ )	0,957	0,962
Логнормальное ( $\ln$ )	0,864	0,952
Логнормальное ( $lg$ )	0,738	0,934

**Заключение.** На основании теории статистических решений показано существование аналитических зависимостей и предельных соотношений между контролируемыми параметрами и погрешностью измерения выходных сигналов. На основе полученных зависимостей предложены уровневый и информационный критерии для количественной оценки значимости параметров, позволяющий осуществлять их ранжировку и в конечном счете выбрать рациональную совокупность параметров при контроле состояния электронного оборудования.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кузьмин И.В. Оценка эффективности и оптимизации автоматических систем контроля и управления. М.: Сов. радио, 1971.
2. Кузьмин А.Б., Пригонюк Н.Д., Никоненко А.В. Методика исследования и практического применения статистической зависимости между параметрами авиационных радиотехнических объектов для коррекции допусков на параметры // Радиотехника. 2011. № 5. С. 97-102.
3. Горбань И.И. Теория гиперслучайных явлений: физические и математические основы / И.И. Горбань. К.: Наук. думка, 2011. 318 с.
4. Yu. Machehkin, "Physical models for analysis of measurement results", Measurement Techniques, vol. 48, no. 6, pp. 555-561, Springer New York, 2005.
5. Мачехин Ю. Анализ результатов измерений в нелинейных динамических системах / Ю. Мачехин, Ю. Курской // Системи обробки інформації. Х.: ХУ ПС, 2012. Вип. 4 (102). С. 169-175.
6. Мачехин Ю. Энтропийный анализ динамических переменных / Ю. Мачехин, Ю. Курской // Системи обробки інформації. Х.: ХУ ПС, 2013. Вип. 1 (108). С. 100-104.
7. H. Schuster, Deterministic chaos. Physik-Verlag Weinheim, 1984.
8. G. Stania, H. Walther, "Quantum Chaotic Scattering in Atomic Physics", Ericson Fluctuations in Photoionization Physical Review Letters, 4 Nov., 2005.
9. Владимиров С.Н. Управление энтропией динамических систем с дискретным и непрерывным временем / С.Н. Владимиров, А.А. Штраух // Журнал технической физики. 2004. Том 74. Вып. 7.
10. Кузьмин А.Б. Достоверность допусковых методов контроля сложных технических систем // Изв. АН СССР. Сер. Автоматика и телемеханика. 1987. № 10.



11. Овсянников А.С., Бурова М.А. Расчет контрольных допусков на параметры динамического объекта // Инфокоммуникационные технологии. 2015. Т. 13. № 3. С. 345-350.
12. A.P. Samoilenko, A.I. Panychev, S.A. Panychev, "Statistical Diagnostics of Irreversible Avionics As a Controlled Random Process", in Proc. 2016 IEEE International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Moscow, Russia, May 12–14, 2016, DOI. 10.1109/SIBCON.2016.7491722.
13. A.P. Samoilenko, A.I. Panychev, S.A. Panychev, "Design Principles of Integrated Criteria for the Evaluation of Effectiveness of Control Systems Survivability Avionics", in Proc. IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2016), Yerevan, October, 14-17, 2016, pp. 252-255.
14. S. Panychev., V. Guzik, A. Samoilenko, A. Panychev, "The prerequisites of forming a risk management system in the design of facilities space application", MATEC Web of Conferences, 102, 01030 (2017) V International Forum for Young Scientists "Space Engineering", DOI. 10.1051/matecconf/201710201030.
15. A.P. Samoilenko, A.I. Panychev, S.A. Panychev, "Evaluation of telecommunication system reliability via stress testing" in Proc. 2017 IEEE International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Astana, Kazakhstan, June 29–30, 2017, DOI. 10.1109/SIBCON.2017.7998430.
16. V.F. Guzik, A.P. Samoilenko, A.I. Panychev, S.A. Panychev, "Reconfiguring of structure as self diagnosis tool of on-board computers", in Proc. 15th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS), Novi Sad, Serbia, Sept. 29 – Oct. 2, 2017. DOI. 10.1109/EWDTS.2017.8110106.
17. Вентцель Е.С. Теория вероятностей: Учеб. Для вузов. – 7-е изд. стер. / Е.С. Вентцель. М.: Высш. шк., 2001. 575 с.
18. Тихонов В.И., Шахтарин Б.И., Сизых В.В. Случайные процессы. Примеры и задачи. Т. 1. Случайные величины и процессы: Учеб. пособие для вузов. Под ред. В.В. Сизых. М.: Радио и связь, 2003. 400 с.
19. Хастингс Н., Пикок Дж. Справочник по статистическим распределениям. М.: Статистика, 1980.
20. Переверзев Е.С. Надежность и испытания технических систем. Киев: Наук. думка, 1990. 328 с.

V.F. Guzik, A.P. Samoylenko, A.I. Panychev, S.A. Panychev  
**CRITERIA OF THE VARIATIONS SIGNIFICANCE IN THE SENSORS  
SIGNALS OF THE ELECTRONIC EQUIPMENT TOLERANCE  
CONTROL BUILT-IN SYSTEM**

*Southern Federal University, Taganrog, Russia*

*The built-in system for monitoring and diagnostics of electronic equipment is considered. The performance indicators of the electronic device are modeled by complex time functions of the monitored parameters that display the state of the equipment functional units. A complex criterion for estimating the significance of variations in the sensors signals of functional control points of a controlled object is proposed. The decision on the state of the object under control is based on the results of measurements of its output characteristics and is made on the basis of the combination of two criteria - level and informational. The estimate of the significance of the parameter level characterizes the magnitude of the emissions of the output signal and is constructed on the basis of the likelihood ratio in accordance with the criterion of the minimum probability of an erroneous solution. The informational criterion is based on the principle of the maximum of Jain's entropy and gives an estimate of the information amount obtained when measuring the output characteristic of a monitoring object. Estimates of the monitored signal variations significance for the distribution laws of random variables which most commonly used in the problems of electronic equipment reliability are obtained.*

**Keywords:** built-in system, tolerance control, diagnostics, random process, random variables distribution law.

### REFERENCES

1. I.V. Kuzmin, [“Otsenka effektivnosti i optimizatsii avtomaticheskikh sistem kontrolya i upravleniya” (in Russian)], Evaluation of efficiency and optimization of automatic control and management systems, Moscow: Sov. radio, 1971.
2. A.B. Kuzmin, N.D. Prigonyuk, A.V. Nikonenko, [“Metodika issledovaniya i prakticheskogo primeneniya statisticheskoy zavisimosti mezhdru parametrami aviatsionnykh radiotekhnicheskikh ob'yektov dlya korrektsii dopuskov na parametry” (in Russian)], “Methodology of research and practical application of statistical dependence between the parameters of aviation radio engineering objects for correction of tolerances on parameters”, Radiotekhnika, no. 5, 2011, pp. 97-102.
3. I.I. Gorban, [“Teoriya gipersluchaynykh yavleniy: fizicheskiye i matematicheskiye osnovy” (in Russian)], Theory of hyper-random phenomena: physical and mathematical foundations, Kiev: Nauk. dumka, 2011.
4. Yu. Machekhin, “Physical models for analysis of measurement results”, Measurement Techniques, vol. 48, no. 6, pp. 555-561, Springer New York,

- 2005.
5. Yu. Machekhin, ["Analiz rezul'tatov izmereniy v nelineynykh dinamicheskikh sistemakh" (in Russian)], "Analysis of measurement results in nonlinear dynamical systems", *Sistemi obrobki informatsii*, Iss. 4(102), 2012, pp. 169-175.
  6. Yu. Machekhin, ["Entropiynyy analiz dinamicheskikh peremennykh" (in Russian)], "Entropy analysis of dynamical variables", *Sistemi obrobki informatsii*, Iss. 1(108), 2013, pp. 100-104.
  7. H. Schuster, *Deterministic chaos*. Physik-Verlag Weinheim, 1984.
  8. G. Stania, H. Walther, "Quantum Chaotic Scattering in Atomic Physics", *Ericson Fluctuations in Photoionization Physical Review Letters*, 4 Nov., 2005.
  9. S.N. Vladimirov, ["Upravleniye entropiyey dinamicheskikh sistem s diskretnym i nepreryvnym vremenem" (in Russian)], "Control of the entropy of dynamical systems with discrete and continuous time", *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*, vol. 74, Iss. 7, 2004.
  10. A.B. Kuzmin, ["Dostovernost' dopuskovykh metodov kontrolya slozhnykh tekhnicheskikh sistem" (in Russian)], "Reliability of tolerant methods for controlling complex technical systems", *Izv. AN SSSR. Ser. Automation and telemechanics*, no. 10, 1987.
  11. A.S. Ovsyannikov, M.A. Burova, ["Raschet kontrol'nykh dopuskov na parametry dinamicheskogo ob'yekta" (in Russian)], "Calculation of control tolerances on the parameters of a dynamic object", *Infokommunikatsionnyye tekhnologii*, vol. 13, no. 3, 2015, pp. 345-350.
  12. A.P. Samoilenko, A.I. Panychev, S.A. Panychev, "Statistical Diagnostics of Irreversible Avionics As a Controlled Random Process", in *Proc. 2016 IEEE International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*, Moscow, Russia, May 12-14, 2016, DOI. 10.1109/SIBCON.2016.7491722.
  13. A.P. Samoilenko, A.I. Panychev, S.A. Panychev, "Design Principles of Integrated Criteria for the Evaluation of Effectiveness of Control Systems Survivability Avionics", in *Proc. IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2016)*, Yerevan, October, 14-17, 2016. pp. 252-255.
  14. S. Panychev., V. Guzik, A. Samoilenko, A. Panychev, "The prerequisites of forming a risk management system in the design of facilities space application", *MATEC Web of Conferences*, 102, 01030 (2017) V International Forum for Young Scientists "Space Engineering", DOI.

- 10.1051/mateconf/201710201030.
15. A.P. Samoylenko, A.I. Panychev, S.A. Panychev, “Evaluation of telecommunication system reliability via stress testing” in Proc. 2017 IEEE International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Astana, Kazakhstan, June 29–30, 2017, DOI. 10.1109/SIBCON.2017.7998430.
  16. V.F. Guzik, A.P. Samoylenko, A.I. Panychev, S.A. Panychev, “Reconfiguring of structure as self diagnosis tool of on-board computers”, in Proc. 15th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS), Novi Sad, Serbia, Sep.t 29 – Oct. 2, 2017. DOI. 10.1109/EWDTS.2017.8110106.
  17. E.S. Wentzel, [“Teoriya veroyatnostey” (in Russian)], Theory of Probability, M.: Vysh. shk., 2001.
  18. V.I. Tikhonov, B.I. Shakhtarin, V.V. Sizykh, [“Sluchaynyye protsessy. Primery i zadachi. T. 1. Sluchaynyye velichiny i protsessy” (in Russian)], Random processes. Examples and tasks. Vol. 1. Random variables and processes, M.: Radio i svyaz', 2003.
  19. N. Hastings, J. Peacock, Handbook of statistical distributions, M .: Statistics, 1980.
  20. E.S. Pereverzev, [“Nadezhnost' i ispytaniya tekhnicheskikh sistem” (in Russian)], Reliability and testing of technical systems, Kiev: Nauk. dumka, 1990.