

# МАТЕМАТИЧНЕ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

### MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELLING

УДК 621.396.6, 621.8.019.8

Артюхова М. А.<sup>1</sup>, Жаднов В. В.<sup>2</sup>, Полесский С. Н.<sup>3</sup><sup>1</sup>Аспирант, Московский институт электроники и математики национального исследовательского университета «Высшая школа экономики», Россия<sup>2</sup>Канд. техн. наук, профессор, Московский институт электроники и математики национального исследовательского университета «Высшая школа экономики», Россия, E-mail: vzhadnov@hse.ru<sup>3</sup>Канд. техн. наук, доцент, Московский институт электроники и математики национального исследовательского университета «Высшая школа экономики», Россия

#### МЕТОД УЧЕТА ВЛИЯНИЯ СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА НАДЕЖНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЯ ПРИ РАСЧЕТНОЙ ОЦЕНКЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БЕЗОТКАЗНОСТИ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

В статье рассмотрены основные аспекты современного подхода к прогнозированию показателей безотказности электронных средств ответственного назначения. Показано, что при расчетной оценке интенсивности отказов таких изделий следует учитывать не только технические и программные средства, но и факторы, характеризующие систему менеджмента предприятия.

**Ключевые слова:** электронные средства, надежность, интенсивность отказов.

В принятых в настоящее время методиках расчета интенсивности отказов электронных средств (ЭС) уровень требований к разработке и изготовлению аппаратуры (отработанность техпроцесса и уровень организации производства аппаратуры) учитывается с помощью «Коэффициента качества производства аппаратуры» [1]:

$$\Lambda_{PЭА} = K_A \cdot \Lambda_{\Sigma},$$

где  $\Lambda_{PЭА}$  – интенсивность отказов ЭС;  $K_A$  – коэффициент качества производства аппаратуры;  $\Lambda_{\Sigma}$  – суммарная интенсивность отказов комплектующих элементов.

Коэффициент  $K_A$  учитывает и отражает среднестатистическую разницу в интенсивности отказов элементов в аппаратуре, разрабатываемой и изготовляемой по требованиям различной нормативной документации (НД). Так, в справочнике «Надежность ЭРИ» [1] приведены следующие значения коэффициента в зависимости от НД:

- по комплексу стандартов «Мороз-...»;
- по положению «РК-...».

Нетрудно заметить, что коэффициент  $K_A$  представляет собой интегральную оценку влияния требований

НД на интенсивность отказов аппаратуры. Кроме того, коэффициент эксплуатации ( $K_{Э}$ ), который учитывает степень жесткости условий эксплуатации и показывает, во сколько раз интенсивность отказов электрорадиоизделий (ЭРИ) в аппаратуре конкретного класса (группы эксплуатации по ГОСТ РВ 20.39.301 [2]) выше при всех прочих равных условиях, чем в наземной стационарной аппаратуре [1], так же представляет интегральную оценку влияния внешних воздействующих факторов (ВВФ). Вопросы дифференцированной оценки влияния ВВФ при расчетах коэффициента рассмотрены в [3], где показано, что в ряде случаев дифференцированная оценка влияния ВВФ позволяет повысить точность оценки коэффициента  $K_{Э}$  в модели интенсивности отказов ЭРИ и, следовательно, прогнозирования показателей безотказности ЭС в целом.

Исходя из этого, а так же принимая во внимание то, что наряду с требованиями НД при проектировании ЭС действуют и требования системы менеджмента качества (СМК), в состав которых входят системы менеджмента надежности (СМН), для определения значения коэффициента  $K_A$ , при наличии аттестованной СМК следует

применять не только чисто статистические, но и экспертные оценки. Так, в RIAC-HDBK-217Plus [4] приведена методика экспертной оценки коэффициента  $K_A$ , в основу которых положена следующая классификация категорий отказов ЭС:

- конструктивные отказы (design);
- производственные отказы (manufacturing);
- эксплуатационные отказы (induced);
- деградационные отказы (wearout);
- отказы комплектующих элементов (parts);
- отказы программного обеспечения (software);
- отказы, обусловленные несовершенством системы управления (system management);
- отказы, обусловленные несовершенством методов контроля (no defect).

Определения первых четырех видов отказов приведены в ГОСТ 27.002 [5], для остальных пояснения приведены ниже.

Отказы комплектующих элементов – отказы, возникающие по причине таких изменений параметров элемента, при которых он не может выполнять свои функции.

Отказы программного обеспечения – отказы, возникающие по причине проявления таких ошибок в коде программы, при которых она не может выполнять свои функции.

Отказы, обусловленные несовершенством системы управления – отказы, возникающие по причине не правильной трактовки требований технического задания, несовершенством мероприятий программы обеспечения надежности и (или) не достаточностью ресурсов, выделенных для ее выполнения.

Отказы, обусловленные несовершенством методов контроля – отказы, возникающие по причине не возможности выявления латентных дефектов существующими методами тестирования и контроля.

В [4] также приведено типовое процентное распреде-

ление отказов ЭС по каждой из рассмотренных выше категорий, которое показано на рис. 1.

Как следует из рис. 1, доля отказов ЭС, вызванных отказами комплектующих элементов, достигает 22 %, что лишний раз подтверждает необходимость повышения точности и достоверности оценки их интенсивностей отказов. Кроме того, доля конструктивных и производственных отказов в сумме составляет 24 %, что также свидетельствует о целесообразности повышения точности и достоверности оценки значения коэффициента  $K_A$ , особенно для ЭС космических аппаратов с длительными сроками активного существования [6].

Очевидно, что для различных классов ЭС распределение отказов может быть и иным, но при отсутствии таких данных данное распределение (см. рис. 1) может использоваться для расчета коэффициента  $K_A$  по математической модели, приведенной в [4]:

$$K_A = P_P \cdot P_{IM} \cdot P_E + P_D \cdot P_G + P_M \cdot P_{IM} \times \\ \times P_E \cdot P_G + P_S \cdot P_G + P_I + P_N + P_W, \quad (1)$$

где  $P_P$  – коэффициент, учитывающий отказы комплектующих элементов;  $P_{IM}$  – коэффициент, учитывающий отказы в начальный период (в период гарантийного срока);  $P_E$  – коэффициент, учитывающий отказы из-за влияния внешней среды;  $P_D$  – коэффициент, учитывающий конструктивные отказы;  $P_G$  – коэффициент, учитывающий отказы, обусловленные несовершенством управления повышением надежности;  $P_M$  – коэффициент, учитывающий производственные отказы;  $P_S$  – коэффициент, учитывающий отказы, обусловленные несовершенством системы управления;  $P_I$  – коэффициент, учитывающий эксплуатационные отказы;  $P_N$  – коэффициент, учитывающий отказы, обусловленные несовершенством методов контроля;  $P_W$  – коэффициент, учитывающий деградационные отказы.

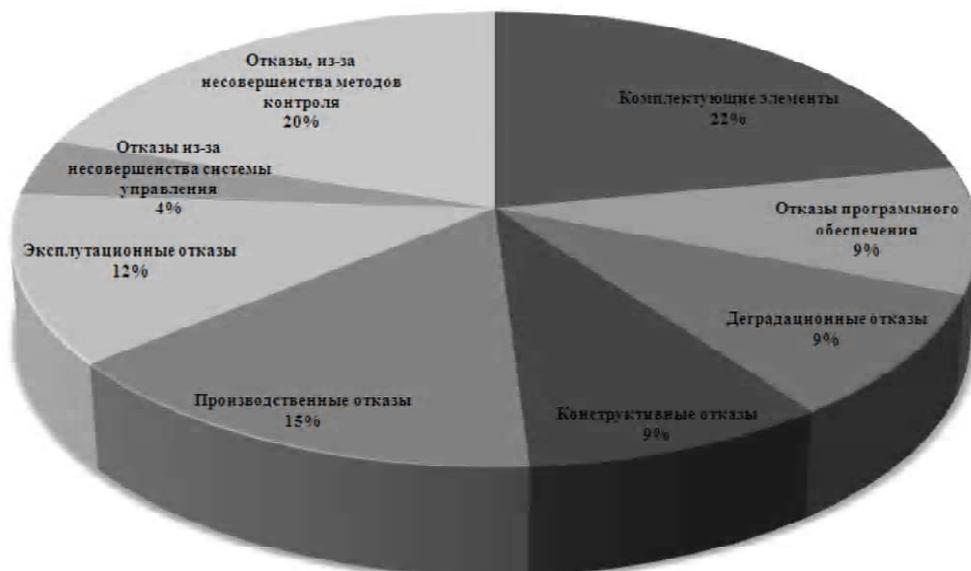


Рис. 1. Типовое распределение отказов ЭС по категориям

Как следует из выражения (1)  $K_A$  представляет собой не интегральную, как в [1], а многофакторную (дифференцированную) оценку качества производства ЭС. На рис. 2 приведена типовая гистограмма влияния коэффициентов модели (1) на значение  $K_A$ , приведенная в [7].

Из рис. 2 хорошо видно, что наибольший вклад в значение  $K_A$  вносят коэффициенты  $\Pi_D, \Pi_M, \Pi_P$  и  $\Pi_S$ , а коэффициенты  $\Pi_N, \Pi_I$  и  $\Pi_W$  – наименьший.

Значения коэффициента  $\Pi_{IM}$  модели (1) рассчитывается по формуле:

$$\Pi_{IM} = \frac{t^{-0,62}}{1,77} \cdot (1 - SS_{ESS}), \quad (2)$$

где  $t$  – гарантийный срок (наработка);  $SS_{ESS}$  – коэффициент обнаружения латентных дефектов.

Значения коэффициента  $SS_{ESS}$  в выражении (2) рассчитывается по формуле:

$$SS_{ESS} = \frac{SS}{ESS},$$

где  $SS$  – число обнаруженных дефектов;  $ESS$  – общее число латентных дефектов.

Значения коэффициента  $\Pi_E$  модели (1) рассчитывается по формуле:

$$\Pi_E = \frac{0,855 \cdot \left\{ 0,8 \cdot \left[ 1 - e^{-0,065 \cdot (\Delta T + 0,6)^{0,6}} \right] + 0,2 \cdot \left( 1 - e^{-0,046 \cdot G^{1,71}} \right) \right\}}{0,205}, \quad (3)$$

где  $\Delta T$  – изменение температуры;  $G$  – среднеквадратичное ускорение случайной вибрации.

На рис. 3 приведен вид зависимости  $\Pi_E$  от  $G$ .

Значение  $\Delta T$  в выражении (3) рассчитывается по формуле:

$$\Delta T = T_{\text{раб}} - T_{\text{ож}},$$

где  $T_{\text{раб}}$  – температура в рабочем режиме;  $T_{\text{ож}}$  – температура в режиме ожидания.

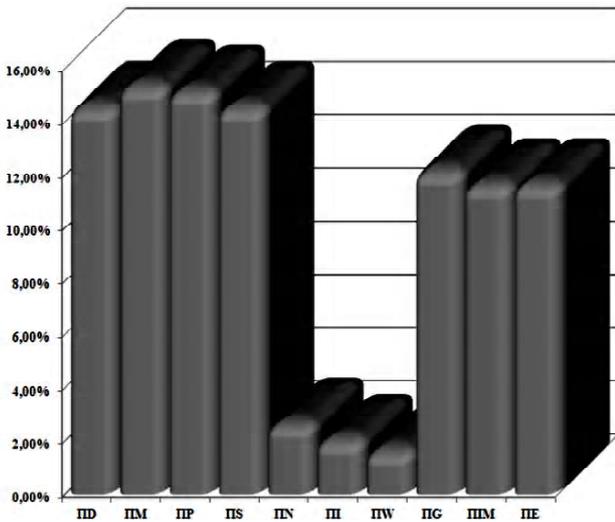


Рис. 2. Типовая гистограмма влияния коэффициентов математической модели  $K_A$

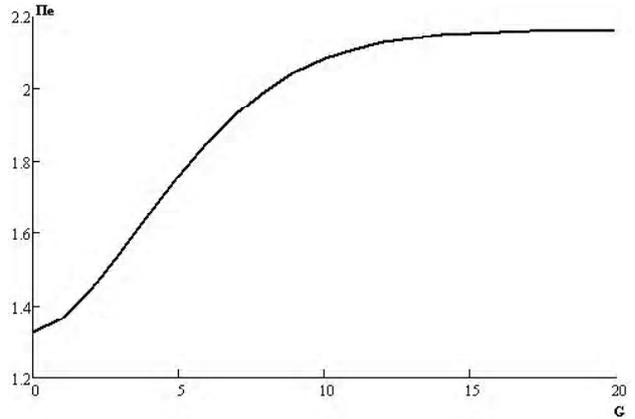


Рис. 3. Зависимость  $\Pi_E$  от  $G$

На рис. 4 приведен вид зависимости  $\Pi_E$  от  $\Delta T$ .

Значения коэффициентов  $\Pi_P, \Pi_D, \Pi_M, \Pi_S, \Pi_I, \Pi_N$  и  $\Pi_W$  модели (1) рассчитывается по формуле:

$$\Pi_i = \alpha_i \cdot \left[ -\ln(R_i) \right]^{\frac{1}{\beta_i}}, \quad (4)$$

где  $\alpha_i$  и  $\beta_i$  – постоянные коэффициенты  $i$ -ой категории отказов;  $R_i$  – экспертная оценка  $i$ -ой категории отказов.

Рекомендуемые значения коэффициентов  $\alpha_i$  и  $\beta_i$  приведены в табл. 1.

Значение  $R_i$  в выражении (4) рассчитывается по формуле:

$$R_i = \frac{\sum_{j=1}^{n_i} (G_{ij} \cdot W_{ij})}{\sum_{j=1}^{N_i} W_{ij}}, \quad (5)$$

где  $G_{ij}$  – значение  $j$ -го критерия  $i$ -ой категории отказа;  $W_{ij}$  – весовой коэффициент  $j$ -го критерия  $i$ -ой категории отказа;  $n_i$  – количество критериев  $i$ -ой категории отказа.

Значения коэффициентов  $G_{ij}$  и  $W_{ij}$  модели (5) определяются по вопроснику, приведенному в [4]. На рис. 5, в качестве примера, приведен фрагмент таблицы, содержащей вопросы и соответствующие ответы на эти вопросы значения коэффициентов  $G_{ij}$  и  $W_{ij}$ .

Значения коэффициента  $\Pi_G$  модели (1) рассчитывается по формуле:

$$\Pi_G = \frac{1,12 \cdot (t - 2)^{-\alpha}}{2^{-\alpha}}, \quad (6)$$

где  $\alpha$  – константа роста надежности ( $\alpha = R_i$ ).

Значение  $R_i$  в выражении (6) рассчитывается по формуле (5) для категории «Повышение надежности».

На рис. 6 приведен типичный вид зависимости  $\Pi_i$  от  $R_i$  по формуле (4).

**Таблиця 1.** Значення коефіцієнтів  $\alpha_i$  і  $\beta_i$

№ п.п.	Коефіцієнт	$\Pi_i$						
		$\Pi_P$	$\Pi_D$	$\Pi_M$	$\Pi_S$	$\Pi_I$	$\Pi_N$	$\Pi_W$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	$\alpha_i$	0,30	0,12	0,21	0,06	0,18	0,29	0,13
2	$\beta_i$	1,62	1,29	0,96	0,64	1,58	1,92	1,68

Question	$G_{ij}$	$W_{ij}$
What is the % of lead design engineering people with cross training experience in manufacturing or field operations (thresholds at 10, 20%)?	<10 = 0 10-20 = .5 >20 = 1	5
What is the % of team members having relevant product experience (thresholds at 25, 50%)?	<25 = 0 25-50 = .5 >50 = 1	5
What is the % of team members having relevant process experience. i.e. they have previously developed a product under the current development process (thresholds at 20, 40%)?	<20 = 0 20-40 = .5 >40 = 1	4
What is the % of development team that have 4-year technical degrees (thresholds at 20, 40%)?	<20 = 0 20-40 = .5 >40 = 1	3
What is the % of engineering team having advanced technical degrees (thresholds at 10, 20%)?	<10 = 0 10-20 = .5 >20 = 1	3
What is the % of engineering team members involved in professional activities in the past year: hold patents; authored/presented papers; are registered professional engineers, or professional society officers at the National level (thresholds at 10, 20%)?	<10 = 0 10-20 = .5 >20 = 1	2
What is the % of engineering team members who have taken engineering courses in the past year (thresholds at 10, 20%)?	<10 = 0 10-20 = .5 >20 = 1	2
Are resource people identified for program technology support across key technology and specialty areas such as optoelectronics, servo control, Application Specific Integrated Circuits (ASIC) design, etc., to provide program guidance and support as needed?	Yes = 1 No = 0	7
Are resource people identified, for program tools support, to provide guidance and assistance with Computer Aided Design (CAD) simulation, etc.?	Yes = 1 No = 0	6
How many (0, 1, 2, 3) of the program objectives of cost, schedule and reliability did the manager successfully meet for the last program that he/she was responsible?	3 = 1 2 = .5 1 = .25 0 = 0	10

**Рис. 5.** Фрагмент таблиці для определения значений коэффициентов  $G_{ij}$  и  $W_{ij}$

Следует отметить, что в «идеальном» случае значения коэффициентов  $P_i$  будут равны 0 (см. рис. 6) и, в соответствии с (1), значение  $K_A$  также будет равно 0. Другими словами «идеальная» СМН позволяет создать «абсолютно надежное» ЭС, что едва ли достижимо на практике [8].

Несмотря на это ограничение, применение модели (1) может оказаться полезным для уточнения прогнозной оценки интенсивностей отказов ЭС на ранних этапах проектирования. На рис. 7 приведена укрупненная функциональная модель процесса прогнозирования надежности ЭС с учетом факторов СМН.

На вход блока А0 (см. рис. 7) поступает техническое задание (ТЗ) на разработку ЭС. Ограничения накладываются СМК, СМН и Программой обеспечения надежности (ПОН). Результаты А0 поступают в блок А2, где происходит формирование исходных данных, которые поступают в блок А3 для расчета значений коэффициентов  $P_i$ .

В блоке А4 выводятся значения коэффициентов  $P_i$ , которые передаются в блок А5 для расчета  $K_A$ . В блоке А6 на основе Отчета по анализу надежности (значения  $\Lambda_{\Sigma}$ ) из блока А1 и значения  $K_A$  рассчитывается значение  $\Lambda_{PЭА}$ .

В блоке А7 происходит проверка полученного значения на соответствие требованиям ТЗ и в случае положительного результата данные передаются в блок А8 для вы-

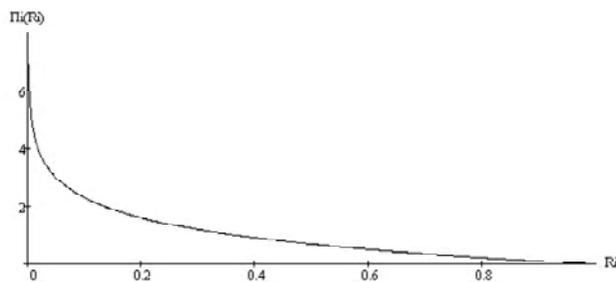


Рис. 6. График типовой зависимости  $P_i$  от  $R_i$

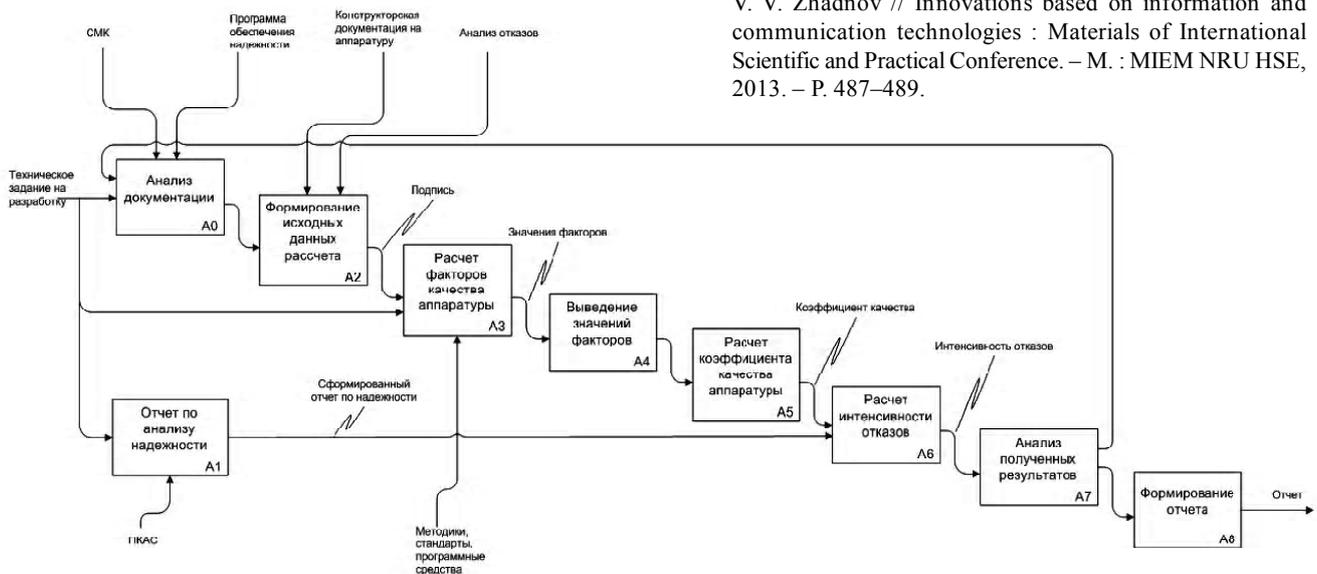


Рис. 7. Укрупненная функциональная модель процесса прогнозирования надежности ЭС

пуска конструкторской документации. В противном случае происходит возврат на начальный этап (блок А0) для корректировки процессов СМК, СМН и мероприятий ПОН.

В заключении следует отметить, что не всегда расчет многофакторного коэффициента качества производства по модели (1) приводит к такому снижению значения  $K_A$ , которое обеспечивает требуемый уровень  $\Lambda_{PЭА}$ . В таких случаях требуется детальный анализ Отчета по анализу надежности и разработка мероприятий по снижению интенсивностей отказов комплектующих элементов [9].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник «Надежность ЭРИ». – М. : МО РФ, 2006. – 641 с.
2. Комплексная система общих технических требований. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Требования стойкости к внешним воздействующим факторам: ГОСТ РВ 20.39.301-98. – [Введен в действие 1998-07-09]. – М. : Госстандарт России, 1998. – 55 с. (Государственный стандарт Российской Федерации).
3. Жаднов, В. В. Методы и средства дифференцированной оценки влияния ВВФ при проектных исследованиях надежности электронных средств / В. В. Жаднов, А. А. Гаршин. // Качество. Инновации. Образование. – 2010. – № 4. – С. 45–51.
4. RIAC-HDBK-217Plus. Handbook of 217PlusTM Reliability Prediction Models. – USA: RIAC. – 182 p.
5. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. ГОСТ 27.002-89. – [Введен в действие 1990-17-01]. – М. : Издательство стандартов, 1990. – 37 с. (Государственный стандарт Союза ССР).
6. Жаднов, В. В. Особенности конструирования бортовой космической аппаратуры : учеб. пособие / В. В. Жаднов, Н. К. Юрков. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2012. – 112 с.
7. Artyukhova, M. Prediction of equipment multifactor quality / M. Artyukhova, S. Polesskiy // Innovations based on information and communication technologies: Materials of International Scientific and Practical Conference. – М. : MIEM NRU HSE, 2013. – P. 499–503.
8. Zhadnov, V. V. Applying the methodology 217PlusTM in predicting the reliability of on-board equipment / V. V. Zhadnov // Innovations based on information and communication technologies : Materials of International Scientific and Practical Conference. – М. : MIEM NRU HSE, 2013. – P. 487–489.

9. *Абрамешин, А. Е.* Информационная технология обеспечения надежности электронных средств наземно-космических систем: научное издание / А. Е. Абрамешин,

В. В. Жаднов, С. Н. Полесский. – Екатеринбург : Форт Диалог-Исеть, 2012. – 565 с.

Стаття надійшла до редакції 11.10.2013.

Артюхова М. А.<sup>1</sup>, Жаднов В. В.<sup>2</sup>, Поліський С. М.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Аспірант, Московський інститут електроніки і математики національного дослідницького університету «Вища школа економіки», Росія

<sup>2</sup>Канд. техн. наук, професор, Московський інститут електроніки і математики національного дослідницького університету «Вища школа економіки», Росія

<sup>3</sup>Канд. техн. наук, доцент, Московський інститут електроніки і математики національного дослідницького університету «Вища школа економіки», Росія

#### **МЕТОД УРАХУВАННЯ ВПЛИВУ СИСТЕМИ МЕНЕДЖМЕНТУ НАДІЙНОСТІ ПІДПРИЄМСТВА ПРИ РОЗРАХУНКОВИЙ ОЦІНКІ ПОКАЗНИКІВ БЕЗВІДМОВНОСТІ ЕЛЕКТРОННИХ ЗАСОБІВ**

У статті розглянуто основні аспекти сучасного підходу до прогнозування надійності електронних засобів відповідального призначення. Показано, що при розрахунковій оцінці інтенсивності відмов таких виробів слід враховувати не тільки технічні і програмні засоби, але фактори, що характеризують систему менеджменту надійності підприємства.

**Ключові слова:** електронні засоби, надійність, інтенсивність відмов.

Artyukhova M. A.<sup>1</sup>, Zhadnov V. V.<sup>2</sup>, Polesskiy S. N.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Postgraduate student, Moscow Institute of Electronics and Mathematics of the National Research University «Higher School of Economics», Russia

<sup>2</sup>Ph.D., Professor, Moscow Institute of Electronics and Mathematics of the National Research University «Higher School of Economics», Russia

<sup>3</sup>Ph.D., associate Professor, Moscow Institute of Electronics and Mathematics of the National Research University «Higher School of Economics», Russia

#### **IMPACT CONSIDERATION METHOD OF DEPENDABILITY MANAGEMENT SYSTEM OF THE ENTERPRISE FOR ESTIMATED ASSESSMENT OF THE ELECTRONIC EQUIPMENT RELIABILITY**

The current period of creation of the electronic equipment of a responsible and special purpose is characterized by universal introduction of the Quality Management Systems at the enterprises developers and producers of electronic equipment. Quality Management System and its component – Dependability Management System are aimed at providing the guaranteed level of indicators of quality (including and dependability indicators).

In the reliability prediction method recommended by the Russian standards influence of procedures of Dependability Management System is considered with the help of «Coefficient Quality Production Equipment» ( $K_A$ ). This coefficient considers and reflects an average difference in failure rate of elements in the equipment developed and manufactured on requirements of various standard documentation (1 – for a complex of the standards «Moroz ...» or 0,2 – for the situation «RK-...»).

However, such approach to forecasting reliability prediction of electronic equipment at the early design stages, based on use of average statistical data rather approximate. It doesn't consider neither features of Dependability Management System of the concrete enterprise, nor completeness of the Support Reliability Program when developing.

Therefore more adequate approach to an assessment of value of the coefficient  $K_A$  realized in methodology 217Plus™ is represented. According to this methodology when forecasting value of the coefficient  $K_A$  are used not only statistical estimates, but also an expert assessment of Dependability Management System effectiveness during the developing and production of the equipment.

The article discusses all the features of application of methodology 217Plus™ for an assessment of the coefficient  $K_A$ : mathematical model of multiple-factor coefficient of quality of production, analysis of influence of its components on the general level and functional model of reliability prediction process.

**Keywords:** electronic equipment, reliability, failure rate.

#### **REFERENCES**

1. Spravochnik «Nadezhnost' EhRI», Moscow, MO RF, 2006, 641 p.
2. Kompleksnaya sistema obschih tehnikeskikh trebovaniy. Apparatura, pribory, ustroystva i oborudovanie voennogo naznacheniya. Trebovaniya stoykosti k vneshnim vozdeystvuyuschim faktoram, GOST RV 20.39.301-98, [Vveden v deystvie 1998-07-09], Moscow, Gosstandart Rossii, 1998, 55 p. (Gosudarstvennyj standart Rossiyskoy Federatsii).
3. Zhadnov V. V., Garshin A. A. Metody i sredstva differentsirovannoy otsenki vliyaniya VVF pri proektnykh issledovaniyakh nadyozhnosti ehlektronnykh sredstv, *Kachestvo. Innovatsii. Obrazovanie*, 2010, No. 4, pp. 45–51.
4. RIAC-HDBK-217Plus. Handbook of 217Plus™ Reliability Prediction Models, USA, RIAC, 182 p.
5. Nadezhnost' v tekhnike. Osnovnye ponyatiya. Terminy i opredeleniya. GOST 27.002-89, [Vveden v deystvie 1990-17-01], Moscow, Izdatel'stvo standartov, 1990, 37 p. (Gosudarstvennyj standart Soyuz SSR).
6. Zhadnov V. V., Yurkov N. K. Osobennosti konstruirovaniya bortovoy kosmicheskoy apparatury, ucheb. posobie, Penza, Izd-vo PGU, 2012, 112 p.
7. Artyukhova M., Polesskiy S. Prediction of equipment multifactor quality, Innovations based on information and communication technologies: Materials of International Scientific and Practical Conference, Moscow, MIEM NRU HSE, 2013, pp. 499–503.
8. Zhadnov V. V. Applying the methodology 217Plus™ in predicting the reliability of on-board equipment, Innovations based on information and communication technologies: Materials of International Scientific and Practical Conference, Moscow, MIEM NRU HSE, 2013, pp. 487–489.
9. Abrameshin A. E., Zhadnov V. V., Polesskiy S. N. Informatsionnaya tekhnologiya obespecheniya nadyozhnosti ehlektronnykh sredstv nazemno-kosmicheskikh sistem: nauchnoe izdanie. Ekaterinburg, Fort Dialog-Iset', 2012, 565 p.