

СОДЕРЖАНИЕ

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПРОБЛЕМ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА

Северцев Н. А., Бецков А. В., Дарьина А. Н. РАЗРАБОТКА ВЕРОЯТНОСТНЫХ КРИТЕРИЕВ БЕЗОПАСНОГО УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТАМИ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕХНИКИ.....	3
Роганов В. Р., Гришко А. К., Кочегаров И. И. ТРИ ПОДХОДА К ОЦЕНКЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СИСТЕМ АКТИВНОГО РЕЗЕРВИРОВАНИЯ.....	9
Северцев Н. А., Бецков А. В., Дарьина А. Н. МЕТОДЫ И МОДЕЛИ СОЗДАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ.....	19

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ

Иванов А. И., Вятчанин С. Е., Малыгина Е. А., Лукин В. С. ПРЕЦИЗИОННАЯ СТАТИСТИКА: НЕЙРОСЕТЕВОЕ ОБОБЩЕНИЕ ХИ-КВАДРАТ КРИТЕРИЯ И КРИТЕРИЯ ШАПИРО – УИЛКА ПРИ АНАЛИЗЕ МАЛЫХ ВЫБОРОК БИОМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ.....	27
Михайлов В. С. НЕЯВНЫЕ ОЦЕНКИ ДЛЯ ПЛАНА С ОГРАНИЧЕННЫМ ВРЕМЕНЕМ ИСПЫТАНИЙ И ВОССТАНОВЛЕНИЕМ ИЗДЕЛИЙ В СЛУЧАЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ОТКАЗА.....	35
Маслобоев А. В. МОДЕЛЬ И ТЕХНОЛОГИЯ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В УСЛОВИЯХ СЕТЕЦЕНТРИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ РЕГИОНАЛЬНОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ.....	43

ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

Лысенко А. В., Таньков Г. В., Калашников В. С., Горячев Н. В., Кочегаров И. И. АЛГОРИТМ РЕАЛИЗАЦИИ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ ВИБРАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ БОРТОВОЙ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ.....	60
Михеев М. Ю., Прокофьев О. В., Тюрин М. В., Ярославцева Д. А. АНАЛИЗ КОРОТКОГО ВРЕМЕННОГО РЯДА В КАРТЕ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА.....	70
Григорьев А. В., Лысенко А. В., Подсякин А. С., Трусов В. А., Юрков Н. К. ПРИВЕДЕННАЯ ПОГРЕШНОСТЬ ТЕХНОЛОГИИ ИЗМЕРЕНИЯ АППЛИКАТЫ ВИБРАЦИОННОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА РАЗМЫТИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ КРУГЛОЙ МЕТКИ.....	79
Романенко Ю. А., Свиридов В. В. МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ВЫБОРУ СРЕДСТВ ОХРАНЫ КРИТИЧЕСКИ ВАЖНОГО ОБЪЕКТА.....	87
Мусаев Р. Ш., Ляшенко А. В., Тюрин М. В., Ярославцева Д. А. ПРИМЕНЕНИЕ SALS-ТЕХНОЛОГИЙ И СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРИ СОЗДАНИИ ДАТЧИКО-ПРЕОБРАЗУЮЩЕЙ АППАРАТУРЫ И СИСТЕМ ДЛЯ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ И НАЗЕМНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ.....	91
Михайлов В. С., Юрков Н. К. ЧАСТНЫЙ СЛУЧАЙ НАХОЖДЕНИЯ ЭФФЕКТИВНЫХ ОЦЕНОК.....	103

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ИНФОРМАТИКИ

Ширинкина Е. В. ОЦЕНКА ТРЕНДОВ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ФИНАНСОВОЙ ОТРАСЛИ.....	114
--	-----

ОРГАНИЗАЦИЯ И БЕЗОПАСНОСТЬ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ

Цыганов А. В. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ В УПРАВЛЕНИИ КАЧЕСТВОМ КОНТРЕЙЛЕРНЫХ ПЕРЕВОЗОК.....	121
---	-----

CONTENT

FUNDAMENTALS OF RELIABILITY ISSUES AND QUALITY

Severtsev N. A., Betskov A. V., Dar'ina A. N. DEVELOPMENT OF PROBABLE CRITERIA FOR SAFE MANAGEMENT OF SPECIAL TECHNIQUE OBJECTS.....	3
Roganov V. R., Grishko A. K., Kochegarov I. I. THREE APPROACHES TO EVALUATING THE PERFORMANCE OF ACTIVE RESERVATION SYSTEMS.....	9
Severtsev N. A., Betskov A. V., Dar'ina A. N. METHODS AND MODELS OF CREATING AUTOMATED CONTROL MEANS TO IMPROVE SAFETY FUNCTIONING OF TECHNICAL SYSTEMS	19

TECHNOLOGICAL BASES OF IMPROVING THE RELIABILITY AND QUALITY OF PRODUCTS

Ivanov A. I., Vjatchanin S. E., Malygina E. A., Lukin V. S. PRECISION STATISTICS: NEUROET NETWORKING OF CHI-SQUARE TEST AND SHAPIRO-WILK TEST IN THE ANALYSIS OF SMALL SELECTIONS OF BIOMETRIC DATA.....	27
Mikhaylov V. S. IMPLICIT ESTIMATES FOR A PLAN WITH LIMITED TEST TIME AND PRODUCT RECOVERY IN THE EVENT OF A FAILURE.....	35
Masloboev A. V. DECISION-MAKING SUPPORT MODEL AND TECHNOLOGY FOR REGIONAL SECURITY NETWORK-CENTRIC CONTROL.....	43

DIAGNOSTIC METHODS OF ENSURING THE RELIABILITY AND THE QUALITY OF COMPLEX SYSTEMS

Lysenko A. V., Tankov G. V., Kalashnikov V. S., Goryachev N. V., Kochegarov I. I. THE ALGORITHM OF REALIZATION OF ADAPTIVE SYSTEM VIBRATION TESTING OF THE ONBOARD AVIONICS.....	60
Mikheev M. Y., Prokof'ev O. V., Tyurin M. V., Yaroslavtseva D. A. ANALYSIS OF A SHORT TIME SERIES IN A QUALITY CONTROL CHART	70
Grigoriev A. V., Lysenko A. V., Podsyakin A. S., Trusov V. A., Yurkov N. K. REDUCED ERROR OF MEASUREMENT TECHNOLOGY APPLICATI VIBRATION DISPLACEMENTS BASED ON THE ANALYSIS OF DEFOCUS OF THE IMAGE OF A CIRCULAR MARK	79
Romanenko Yu. A., Sviridov V. V. METHODICAL APPROACH TO THE CHOICE OF MEANS PROTECTION OF CRITICAL OBJECT.....	87
Musaev R. Sh., Lyashenko A. V., Tyurin M. V., Yaroslavtseva D. A. APPLICATION OF CALS-TECHNOLOGIES AND COMPUTER-AIDED DESIGN SYSTEMS WHEN DEVELOPING SENSING-AND-TRANSDUCING DEVICES AND SYSTEMS FOR ROCKET AND SPACE EQUIPMENT AND GROUND-BASED SPACE INFRASTRUCTURE	91
Mikhaylov V. S., Yurkov N. K. A SPECIAL CASE OF FINDING EFFECTIVE ESTIMATES.....	103

GENERAL ISSUES OF COMPUTER SCIENCE

Shirinkina E. V. ASSESSMENT OF DIGITAL TRANSFORMATION TRENDS IN THE FINANCIAL INDUSTRY	114
--	-----

ORGANIZATION AND SAFETY OF ROAD TRAFFIC

Tsyganov A. V. USE OF THE ANALYTIC HIERARCHY PROCESS IN QUALITY MANAGEMENT OF PIGGYBACK TRANSPORTATIONS.....	121
---	-----

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПРОБЛЕМ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА

FUNDAMENTALS OF RELIABILITY ISSUES AND QUALITY

УДК 338.24.01

DOI 10.21685/2307-4205-2019-2-1

Н. А. Северцев, А. В. Бецков, А. Н. Дарьина

РАЗРАБОТКА ВЕРОЯТНОСТНЫХ КРИТЕРИЕВ БЕЗОПАСНОГО УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТАМИ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

N. A. Severtsev, A. V. Betskov, A. N. Dar'ina

DEVELOPMENT OF PROBABLE CRITERIA FOR SAFE MANAGEMENT OF SPECIAL TECHNIQUE OBJECTS

Аннотация. Традиционное научное мышление базируется главным образом на логике Аристотеля и ориентировано на точные количественные методы анализа. Эти методы ставят знак равенства между неопределенностью и случайностью и они не могут распознать неопределенности, связанные с человеком, техникой и внешней средой, возникающие по причине нечеткости последних. Согласно принципу несовместимости Заде [1] на верхнем уровне сложности системы точность и достоверность оценочных заявлений о поведении системы становятся почти что исключаящими друг друга характеристиками, т.е. попытка сделать точной и одновременно достоверной оценку опасности сложной СЧМС может быть иллюзорной задачей, при решении которой традиционные методы надежности не работают. Заде указывает [1]: «Несмотря на то, что обычный математический аппарат применяется и будет применяться для исследования человеко-систем, ясно, что большая сложность таких систем требует подходов, которые по духу и по существу значительно отличаются от традиционных методов – методов, которые весьма эффективны, если применяются к механическим системам, но являются слишком неточными по отношению к системам, в которых поведение человека играет важную роль». Более того, Заде считает, что «для того, чтобы можно было сделать достоверное заключение относительно

Abstract. Traditional scientific thought is mainly based on Aristotle's logic and oriented to accurate quantitative methods of analysis. These methods put equal-sign between ambiguity and accident and it is impossible to recognize the ambiguity connected with person, technique and environment due to illegibility of the last. According Zade's incompatibility principle [1] on top level of system's complexity accuracy and the reliability of evaluation applications of system behavior become mutually exclusive characteristics, i.e. the attempt of making danger of man-machine-environment systems evaluation accurate and simultaneously may be illusory task, while deciding it traditional methods of reliability do not work. Zade indicates [1]: "In spite of the fact that ordinary mathematical apparatus is applied and will be applied for searching "person-systems", it is clear that huge complexity of these systems require such system approaches, which are essentially different from considerably traditional methods which are quite effective, if they are applied to the mechanical systems, but are too inexact to systems, in which behaviour of the person plays an important role". Moreover Back believes that "to make a reliable conclusion regarding behaviour of the person-system, it is possibly required to decline high standards of strictness and accuracy, to which they accustomed in traditional mathematical analysis of well structured mechanical systems, and become more tolerant with reference to

поведения человеко-системы, возможно потребуются отказаться от высоких стандартов строгости и точности, к которым привыкли в традиционном математическом анализе хорошо структурированных механических систем, и стать более терпимым по отношению к подходам, являющимся по своей природе приближенными». Однако авторы полагают, что теория матриц и теория нечетких множеств могут решить такую сложную задачу, как задача управления объектами специальной техники в общем, и задачу качественного обучения операторов в частности. В статье на основе теории матриц определены теоретические и практические знания оператора (экипажа) для безопасного управления системой оборонной техники.

Ключевые слова: матрицы, уровни, усвоение знаний оператором, управление, вероятность, показатель, гарантированные оценки.

approaches being approximate". However, authors believe that the theory of matrixes and the theory of indistinct plenty such can solve so complicated tasks, as the management of the special equipment objects, and the task of operators quality education, in particular. In the article on the basis of theory of matrix theoretical and practical knowledge of the operator (crew) for safe control of system of defensive equipment are defined.

Keywords: matrixes, levels, operator knowledges, control, probability, exponent, rating guaranteed evaluations.

Введение

Ранее было установлено [2], что в качестве условий безопасного управления ОСТ могут быть приняты

$$\begin{aligned} \rho(T, T_0) \leq \rho_{\text{тр}}, \quad \rho(\Pi, \Pi_0) \leq \rho_{\text{тр}}^*, \\ \tau(T, T_0) \leq \tau_{\text{тр}}, \quad \tau(\Pi, \Pi_0) \leq \tau_{\text{тр}}^*. \end{aligned} \quad (1)$$

Первые два из них означают, что расстояния $\rho(T, T_0)$ и $\rho(\Pi, \Pi_0)$ между матрицами T и Π теоретических знаний и практических навыков оператора(ов) и матрицами их требуемых значений T_0 и Π_0 не превысят допустимых пределов (значений) $\rho_{\text{тр}}$ и $\rho_{\text{тр}}^*$ этих расстояний. Вторые два критерия означают, что коэффициенты корреляции $\tau(T, T_0)$ и $\tau(\Pi, \Pi_0)$ между матрицами T и Π теоретических знаний и практических навыков оператора(ов) и матрицами их требуемых значений T_0 и Π_0 будут не меньше допустимых значений $\tau_{\text{тр}}$ и $\tau_{\text{тр}}^*$ этих коэффициентов. Так, ответы оператора от одного теста опроса к другому могут изменяться в зависимости от многих и трудно учитываемых факторов, то следует признать, что элементы матриц T и Π имеют определенный разброс, т.е. являются случайными. Поэтому необходимы признаки, говорящие о выполнении (или невыполнении) критериев (1) успешного овладения операторами навыками безопасного управления системой, разработка которых проводится ниже.

Числа $\rho(T, T_0)$ и $\rho(\Pi, \Pi_0)$ назовем показателями уровня освоения оператором исследуемой системы (сложной человеко-машинной с учетом воздействия окружающей среды) теоретических знаний и практических навыков в области управления этой системой. Числа $\tau(T, T_0)$ и $\tau(\Pi, \Pi_0)$ далее назовем показателями уровня способности оператора к управлению этой системой. Изложенное позволяет перейти к следующему выводу: в качестве критериев безопасного управления человеко-машинной системой можно принять вероятности [3]

$$\begin{aligned} \rho_{\text{бп}} = \rho_p(T, T_0) \leq \rho_{\text{тр}}, \quad \rho_p(\Pi, \Pi_0) \leq \rho_{\text{тр}}^*; \\ \rho_\tau(T, T_0) \leq \tau_{\text{тр}}, \quad \rho_\tau(\Pi, \Pi_0) \leq \tau_{\text{тр}}^*. \end{aligned} \quad (2)$$

Выполнением условий (2) является успешное освоение оператором теоретических и практических навыков, обеспечивающих безопасное управление системой.

Критерии безопасного управления

Рассмотрим более подробно критерии безопасного управления [4], при этом отметим следующие его особенности.

1. Число $\rho_{\text{бп}}$ изменяется в пределах от нуля до единицы, т.е. $0 \leq \rho_{\text{бп}} \leq 1$, причем, чем ближе к единице значение $\rho_{\text{бп}}$, тем выше уровень оператора по безопасности управления системой (СЧМС).

2. Элементы матриц T_0 и Π_0 содержат оценки T_{ij} и Π_{ij} за ответы на вопросы T_{ij} и Π_{ij} учебного плана (программы), который определяется матрицами T и Π . Здесь матрицы T_0 и Π_0 являются случайными, в то время как матрицы T и Π учебного плана (программы) фиксированы (не случайны).

3. В силу случайности матриц T_0 и Π_0 расстояния $\rho(T, T_0)$ и $\rho(\Pi, \Pi_0)$, а также коэффициенты корреляции $\tau(T, T_0)$ и $\tau(\Pi, \Pi_0)$ являются случайными.

4. Числа $\rho_{\text{тр}}$ и $\rho_{\text{тр}}^*$ являются фиксированными (неслучайными) числами, представляющими собой требуемое значение уровня $\rho(T, T_0)$ и $\rho(\Pi, \Pi_0)$ освоения оператором теоретических знаний и практических навыков.

5. Числа $\tau_{\text{тр}}$ и $\tau_{\text{тр}}^*$ являются фиксированными (неслучайными) числами, представляющими собой требуемые значения уровня знаний $\tau(T, T_0)$ и $\tau(\Pi, \Pi_0)$ – уровня способности оператора к управлению исследуемой системой. Определение требуемых значений $\rho_{\text{тр}}$ и $\rho_{\text{тр}}^*$ и $\tau_{\text{тр}}$ и $\tau_{\text{тр}}^*$ осуществляется на основе обработки статистических данных и представляет собой самостоятельную задачу дальнейших исследований в данной области.

Считается, что числа $\rho_{\text{тр}}$ и $\rho_{\text{тр}}^*$ и $\tau_{\text{тр}}$ и $\tau_{\text{тр}}^*$ известны и являются фиксированными. Примем допущение, что события (1) являются независимыми. Тогда вероятность $\rho_{\text{бп}}$ безопасного управления системой можно записать в виде произведения

$$P_{\text{бп}} = P(\rho(\Pi, \Pi_0) \leq \rho_{\text{тр}}^*) P(\tau(T, T_0) \leq \tau_{\text{тр}}) P(\tau(\Pi, \Pi_0) \leq \tau_{\text{тр}}^*)$$

или

$$P_{\text{бп}} = P_{\text{т}} P_{\text{п}} P_{\text{ст}} P_{\text{сп}}. \quad (3)$$

Здесь $P_{\text{т}} = P(\rho(T, T_0) \leq \rho_{\text{тр}})$ и $P_{\text{п}} = P(\rho(\Pi, \Pi_0) \leq \rho_{\text{тр}}^*)$, где $P_{\text{т}}$ – вероятность успешного освоения оператором теоретических сведений; $P_{\text{п}}$ – вероятность освоения практических навыков, обеспечивающих безопасное управление исследуемой человеко-машинной системой. Кроме того, $P_{\text{ст}} = P(\tau(T, T_0) \geq \tau_{\text{тр}})$ и $P_{\text{сп}} = P(\tau(\Pi, \Pi_0) \geq \tau_{\text{тр}}^*)$, где $P_{\text{ст}}$ – вероятность достаточного уровня способностей оператора в области теоретических знаний и $P_{\text{сп}}$ – практических навыков. Расчет каждой из четырех составляющих показателя (3) представляет собой самостоятельную задачу непростой сложности. Рассмотрим разработку метода расчета только одной из составляющих – вероятности $P_{\text{т}}$, имея в виду, что остальные вероятности, входящие в произведение (3), могут быть определены аналогичными методами. Рассмотрим метод расчета вероятности достаточного уровня теоретической подготовки специалиста (оператора) для управления сложной системой (технической и другой).

Рассмотрим вероятность $P_{\text{т}} = P(\rho(T, T_0) \leq \rho_{\text{тр}})$ [5], где $\rho_{\text{тр}}$ – требуемое (допустимое) значение показателя $\rho(T, T_0)$ теоретической подготовки специалиста в области управления исследуемой системой. Согласно изложенному выше показатель $\rho(T, T_0)$ может быть определен следующей формализацией:

$$\rho(T, T_0) = \sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (\pi_{ij} - \tau_{ij})^2},$$

откуда следует, что

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (\pi_{ij} - \tau_{ij})^2 \leq \rho_{\text{тр}}^2.$$

Далее учитываем известное неравенство [6]

$$\frac{1}{\min \rho(T, T_0)} = \frac{1}{\min \sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (\pi_{ij} - \tau_{ij})^2}} \leq \max (\pi_{ij} - \tau_{ij})^2,$$

из которого получим $\max (\pi_{ij} - \tau_{ij})^2 \leq \frac{1}{\min \rho_{\text{тр}}^2}$, следовательно, $\frac{1}{\min \rho(T, T_0)} \leq \frac{1}{\min \rho_{\text{тр}}}$ или $\rho(T, T_0) \leq \rho_{\text{тр}}$, откуда, переходя к вероятности, находим

$$P \left(\max |\pi_{ij} - \tau_{ij}| \leq \frac{1}{\sqrt{\min \rho_{\text{тр}}}} \right) \leq P(\rho(T, T_0) \leq \rho_{\text{тр}}).$$

Таким образом, установлено, что $P_{\text{т}} \geq P_{\text{т}}^*$, где $P_{\text{т}} = P(\rho(T, T_0) \leq \rho_{\text{тр}})$ и $P_{\text{т}}^* = P \left(\max |\pi_{ij} - \tau_{ij}| \leq \frac{1}{\sqrt{\min \rho_{\text{тр}}}} \right)$, т.е. получена гарантированная оценка $P_{\text{т}}^*$ снизу для искомой вероятности $P_{\text{т}}$.

Метод нахождения оценки

Остановимся на разработке методов нахождения этой оценки. Обозначим $\xi \equiv \frac{1}{\sqrt{\min \rho_{\text{тр}}}}$ [7].

Учитывая неравенство $\max |\pi_{ij} - \tau_{ij}| \leq \frac{1}{\sqrt{\min \rho_{\text{тр}}}}$, получим, что $|\pi_{ij} - \tau_{ij}| \leq \xi$ для любой пары (i, j) .

Из этого следует, что вероятность пригодности оператора(ов) к управлению системой по уровню его теоретических знаний равна $P_{\text{т}}^* = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \{ |\pi_{ij} - \tau_{ij}| \leq \xi \}$.

Если события $\{ |\pi_{ij} - \tau_{ij}| \leq \xi \}$ независимы, то условие пригодности оператора находится как $P_{\text{т}} \geq P_{\text{т}}^*$. В другой записи приведенные выражения имеют следующий вид:

$$P_{\text{т}} \geq P_{\text{т}}^* = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n P_{ij},$$

где $P_{ij} = P(|\pi_{ij} - \tau_{ij}| \leq \xi) = P(\pi_{ij} - \xi \leq \tau_{ij} \leq \pi_{ij} + \xi)$.

Предположим в первом приближении, что величина T_{ij} (оценка за ответ на вопрос T_{ij}) имеет нормальное распределение со средним \bar{T}_{ij} и дисперсией T_{ij}^2 . Тогда по свойству нормального распределения: $P_{ij} = \Phi(\bar{T}_{ij} - \pi_{ij} + \xi) / \tau_{ij} - \Phi(\xi + \pi_{ij} + \bar{T}_{ij}) / \tau_{ij}$, где Φ – функция Лапласа [8, 9]. Таким образом, если величины T_{ij} независимы и нормально распределены, то гарантированная оценка для показателя $P_{\text{т}}$ имеет вид

$$P_{\text{т}} \geq P_{\text{т}}^* = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left(\Phi(\bar{T}_{ij} - \pi_{ij} + \xi) / \tau_{ij} - \Phi(\xi + \pi_{ij} + \bar{T}_{ij}) / \tau_{ij} \right),$$

или $P \geq P_{\text{т}}^* = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n P_{ij}$, где вероятности P_{ij} определены выше.

Гарантированная оценка (4) может оказаться значительно завышенной, если не учитывать, что в действительности события $|\pi_{ij} - \tau_{ij}| \leq \xi$ зависимы [10, 11]. Там же доказана возможность учета зависимости этих событий в следующей форме:

$$P \geq P_T^* = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n P_{ij} + K \left(P^* - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n P_{ij} \right). \quad (4)$$

Здесь число K равно среднему значению коэффициентов корреляции между величинами T_{ij} , а P^* – меньшая из вероятностей P_{ij} . Если события $|\pi_{ij} - \tau_{ij}| \leq \xi$ независимы, то число $K = 0$, и из формулы (4) получается прежний результат: $P \geq P_T^* = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n P_{ij}$. В другом крайнем случае, когда все коэффициенты корреляции равны единице, получим $K = 1$: $P \geq P_T^* = P^*$. Таким образом, неучет зависимости событий привел бы к ошибке [12]

$$P = \left(P^* - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n P_{ij} \right) / (1 - P^*),$$

что может составить до нескольких процентов.

Библиографический список

1. Zaden, L. A. Man and Cybernetics / L. A. Zaden // IEEE Transactions on Systems, SMC-3. – 1973. – P. 28–44.
2. Северцев, Н. А. Введение в теорию безопасности / Н. А. Северцев, А. В. Бецков. – Москва : ВЦ им. А. А. Дородницына РАН, 2008. – 176 с.
3. Северцев, Н. А. Системный анализ теории безопасности / Н. А. Северцев, А. В. Бецков. – Москва : Изд-во МГУ «ТЕИС», 2009. – 452 с.
4. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – Москва : Наука, 1971.
5. Бард, И. Нелинейное оценивание параметров / И. Бард. – Москва : Статистика, 1979.
6. Гнеденко, Б. В. Математические методы теории надежности / Б. В. Гнеденко, Ю. К. Беляев, А. Д. Соловьев. – Москва : Наука, 1965.
7. Шолкин, В. Г. К вопросу использования критериальных моделей в практике расчета и испытаний на надежность / В. Г. Шолкин // Труды ВНИИМАШ. – 1977.
8. Рябинин, И. Н. Надежность, живучесть, безопасность систем / И. Н. Рябинин. – Санкт-Петербург, 2008.
9. Иличьев, А. В. Основы анализа эффективности и рисков целевых программ / А. В. Иличьев. – Москва : Научный мир, 2009.
10. Нечеткие множества и теория возможностей. Последние достижения : пер. с англ. / под ред. Р. Р. Ягера. – Москва : Мир, 1986.
11. Лесин, В. В. Основы методов оптимизации / В. В. Лесин, Ю. П. Лисовец. – Москва : Изд. дом МАИ, 1995.
12. Грущанский, В. А. О формализации показателей эффективности и безопасности комплексных программ в условиях неопределенности и риска / В. А. Грущанский, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 2. – С. 3–9.

References

1. Zaden L. A. *IEEE Transactions on Systems, SMC-3*. 1973, pp. 28–44.
2. Severtsev N. A., Betskov A. V. *Vvedenie v teoriyu bezopasnosti* [Introduction to the theory of security]. Moscow: VTs im. A. A. Dorodnitsyna RAN, 2008, 176 p. [In Russian]
3. Severtsev N. A., Betskov A. V. *Sistemnyy analiz teorii bezopasnosti* [A systematic analysis of the theory of security]. Moscow: Izdatel'stvo MGU «TEIS», 2009, 452 p. [In Russian]
4. Adler Yu. P., Markova E. V., Granovskiy Yu. V. *Planirovanie eksperimenta pri poiske optimal'nykh usloviy* [Experiment planning in search of optimal conditions]. Moscow: Nauka, 1971. [In Russian]
5. Bard I. *Nelineynoye otsenivanie parametrov* [Nonlinear parameter estimation]. Moscow: Statistika, 1979. [In Russian]
6. Gnedenko B. V., Belyaev Yu. K., Solov'ev A. D. *Matematicheskie metody teorii nadezhnosti* [Mathematical methods of reliability theory]. Moscow: Nauka, 1965. [In Russian]
7. Sholkin V. G. *Trudy VNIIMASH* [Proceedings of VNIIMS]. 1977. [In Russian]

8. Ryabinin I. N. *Nadezhnost', zhivuchest', bezopasnost' sistem* [Reliability, survivability, safety of systems]. Saint-Petersburg, 2008. [In Russian]
9. Plich'ev A. V. *Osnovy analiza effektivnosti i riskov tselevykh programm* [Framework for the analysis of efficiency and risks of target programs]. Moscow: Nauchnyy mir, 2009. [In Russian]
10. *Nechetkie mnozhestva i teoriya vozmozhnostey. Poslednie dostizheniya: per. s angl.* [Fuzzy sets and possibility theory. Recent achievements : translation from English]. Ed. by R. R. Yager. Moscow: Mir, 1986. [In Russian]
11. Lesin V. V., Lisovets Yu. P. *Osnovy metodov optimizatsii* [Fundamentals of optimization methods]. Moscow: Izd. Dom. MAI, 1995. [In Russian]
12. Grushchanskiy V. A., Yurkov N. K. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2013, no. 2, pp. 3–9. [In Russian]

Северцев Николай Алексеевич

доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник,
Федеральный исследовательский центр
«Информатика и Управление»
Российской академии наук
(Вычислительный центр
им. А. А. Дородницына РАН)
(119333, Россия, г. Москва, ул. Вавилова, 40)
E-mail: severs@ccas.ru

Бецков Александр Викторович

доктор технических наук, доцент,
заместитель начальника,
Академия управления МВД России
(125171, Россия, г. Москва,
ул. Зои и Александра Космодемьянских, 8)
E-mail: abckov@mail.ru

Дарьина Анна Николаевна

кандидат физико-математических наук, доцент,
ведущий научный сотрудник,
Федеральный исследовательский центр
«Информатика и Управление»
Российской академии наук
(Вычислительный центр
им. А. А. Дородницына РАН)
(119333, Россия, г. Москва, ул. Вавилова, 40)
E-mail: daryina@ccas.ru

Severtsev Nikolay Alekseevich

doctor of technical sciences, professor,
chief researcher,
Federal research center
«Computer science and control» of RAS
(Dorodnitsyn computer center
of the Russian Academy of Sciences)
(119333, 40 Vavilova street, Moscow, Russia)

Betskov Aleksandr Viktorovich

doctor of technical sciences,
associate professor, deputy chief,
Management Academy of the Ministry of the Interior
of the Russian Federation
(125171, 8 Zoi i Aleksandra Kosmodem'yanskikh
street, Moscow, Russia)

Darina Anna Nikolaevna

candidate of physical and mathematical sciences,
associate professor, leading researcher,
Federal research center
«Computer science and control» of RAS
(Dorodnitsyn computer center
of the Russian Academy of Sciences)
(119333, 40 Vavilova street, Moscow, Russia)

Образец цитирования:

Северцев, Н. А. Разработка вероятностных критериев безопасного управления объектами специальной техники / Н. А. Северцев, А. В. Бецков, А. Н. Дарьина // Надежность и качество сложных систем. – 2019. – № 2 (26). – С. 3–8. – DOI 10.21685/2307-4205-2019-2-1.

В. Р. Роганов, А. К. Гришко, И. И. Кочегаров

ТРИ ПОДХОДА К ОЦЕНКЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СИСТЕМ АКТИВНОГО РЕЗЕРВИРОВАНИЯ

V. R. Roganov, A. K. Grishko, I. I. Kochegarov

THREE APPROACHES TO EVALUATING THE PERFORMANCE OF ACTIVE RESERVATION SYSTEMS

Аннотация. *Актуальность и цель.* Одним из способов повышения работоспособности систем управления техническими объектами считается активное резервирование. Его использование должно позволить снизить ущерб от нарушения работоспособности АСУ ТП. Снижение аппаратно-программных элементов позволяет за счет незначительного увеличения стоимости аппаратно-программной части АСУ ТП значительно снизить ущерб от нарушения его работоспособности. Однако в литературе при различных оценках целесообразности применения методов активного резервирования нет математического аппарата, который позволил бы точно оценить – насколько целесообразно использовать системы активного резервирования. *Материалы и методы.* В большинстве публикаций предлагают использовать системы активного резервирования, созданные путем объединения нескольких одинаковых элементов, обрабатывающих входную информацию по одинаковым алгоритмам, входы которых соединены вместе, а выходы объединены через решающий элемент. *Результаты.* В статье рассмотрены три подхода к оценке надежности систем активного резервирования. Рассмотрены теоретические подходы к оценке работоспособности таких систем, базирующиеся на математической логике и теории вероятностей. На основании сделанных выводов предложен подход к получению численной оценки работоспособности системы из активных элементов.

Ключевые слова: системы управления техническими объектами, активное резервирование, пассивное резервирование, работоспособность, отказы, мажоритарный контроль.

Abstract. One of the ways to improve the performance of control systems of technical objects is considered active redundancy. Ego use should allow to reduce the damage it impaired the performance of the AUS TP. The reduction of hardware and software elements makes it possible, due to a slight increase in the cost of the hardware and software of a part of the industrial control system, to significantly reduce the damage caused by the disruption of its performance. However, in the literature, with various assessments of the feasibility of using active backup methods, there is no mathematical apparatus that would allow an accurate assessment of how expedient it is to use active backup systems. Most publications suggest using active backup systems created by combining several identical elements that process input information using the same algorithms, the inputs of which are connected together, and the outputs are combined through a crucial element. The article discusses three approaches to assessing the reliability of active backup systems. Theoretical approaches to evaluating the performance of such systems, based on mathematical logic and probability theory, are considered. Based on the findings, an approach is proposed to obtain a numerical evaluation of the system performance from active elements.

Keywords: control systems of technical objects, active backup, passive backup, operability, failures, majority control.

Введение

Задачи повышения надежности систем управления техническими объектами существовали всегда, начиная от появления аналоговых систем управления [1] и после появления АСУ ТП [2]. Одним из способов повышения работоспособности систем управления техническими объектами считается активное резервирование (АР) [3]. Этот способ актуален в настоящее время в связи с необходимостью снизить ущерб от нарушения работоспособности АСУ ТП [4] и в то же время из-за

снижения стоимости аппаратно-программных средств управления техническими объектами [5]. Снижение стоимости позволяет за счет незначительного увеличения стоимости аппаратно-программной части АСУ ТП значительно снизить ущерб от нарушения его работоспособности [7]. Однако в литературе при различных оценках целесообразности применения методов АР нет математического аппарата, который позволил бы точно оценить – насколько целесообразно использовать системы АР.

Обычно к системам АР относят системы, созданные путем объединения нескольких одинаковых элементов, обрабатывающих входную информацию по одинаковым алгоритмам, входы которых соединены вместе, а выходы объединены через решающий элемент [8]. Решающим элементом могут быть логические схемы «И», «ИЛИ», а также мажоритарный элемент [9]. В статье рассмотрены три подхода к оценке надежности систем АР. Для упрощения рассматриваются элементы, относящиеся к устройствам релейной защиты или к дискретным автоматам. Такие системы на выходе генерируют два типа входных сигналов: «0» или «1». Появление «0» означает отсутствие необходимости отключать контролируемую техническую систему. «1» означает необходимость отключать контролируемую техническую систему (как правило, из-за начала развития аварийной ситуации на контролируемой технической системе). Предложены теоретические подходы к оценке работоспособности таких систем, базирующиеся на математической логике и теории вероятностей. На основании сделанных выводов предложен подход к получению численной оценки работоспособности системы из активных элементов.

Основная часть

Известно два основных подхода к решению задачи повышения надежности систем управления техническими объектами. Это активное резервирование (АР) и пассивное резервирование (ПР) [10].

При ПР основной и резервный элементы соединены постоянно. Отказавший элемент не отключается, что при отсутствии реакции на такую ситуацию, предотвращающую негативные последствия наличия в системе управления неисправного элемента, может привести к нежелательным последствиям. Поэтому при ПР необходимо отдельно рассматривать и надежность всей системы в целом и последствия всех возможных отказов элементов [11]. В системах с ПР большое значение приобретает анализ условий работы элементов резервной группы, оставшихся исправными после отказа одного или нескольких элементов. Наиболее желаемое продолжение аварийной ситуации – исключение отказавшего элемента и замена его на работоспособный (один из видов АР – использование системы замещения) [12]. При этом остается неясным, каким образом будет проводиться замена отказавшего элемента и насколько надежна система, обеспечивающая такую замену.

В известных системах АР замещением резервные элементы могут находиться в нагруженном, облегченном и ненагруженном состоянии. Можно и дальше рассматривать и классифицировать системы с ПР, но, как показали исследования, полученные результаты не всегда позволяют численно оценить вероятность нахождения такой системы в работоспособном состоянии [13]. А без этого невозможно выбрать, какую систему необходимо применить на практике, чтобы выполнить предписание заказчика.

Одним из методов получения численных значений показателей надежности рассматриваемой системы является использование статистических методов оценки надежности [14]. Реализующие этот метод методики позволяют оценить, как будет изменяться работоспособность рассматриваемых элементов во времени [15]. При этом возможен вариант учета внешней среды на интенсивность отказов [16].

Рассматривая показатели работы систем, используются следующие вероятностные величины:

- вероятность безотказной работы $p_6(t)$ или вероятность того, что за время t отказ рассматриваемого элемента не произойдет;
- вероятность отказа элемента

$$q(t) = 1 - p_6(t); \quad (1)$$

- плотность распределения наработки до отказа

$$\omega(t) = \frac{dq(t)}{dt} = -\frac{dp_6}{dt}; \quad (2)$$

– среднее значение и дисперсия длительности безотказной работы, описываемая функцией распределения плотности, характеризующей случайный процесс (считается, что для решения многих задач достаточно знать несколько моментов случайной величины), момент k -го порядка

$$m_{k_6} = \int_0^{\infty} t^k \omega(t) dt ; \quad (3)$$

– момент первого порядка или математическое ожидание наработки элемента до первого отказа $m_1\{\xi\}$ обычно обозначают символом T_{cp} , или средняя наработка на отказ, или среднее время безотказной работы

$$T_{cp_6} = \int_0^{\infty} t \omega(t) dp = - \int_0^{\infty} t dp(t) = \int_0^{\infty} p_6(t) dp ; \quad (4)$$

– момент второго порядка (дисперсия)

$$m_{2_6} = \int_0^{\infty} t^2 \omega(t) dt = - \int_0^{\infty} t^2 dp(t) = 2 \int_0^{\infty} t p_6(t) dt ; \quad (5)$$

– дисперсии времени безотказной работы

$$\sigma_{T_6}^2 = m_2 - T_{cp_6}^2 = 2 \int_0^{\infty} t p_6(t) dt - \left(\int_0^{\infty} p_6(t) dt \right) ; \quad (6)$$

– вероятности безотказной работы на интервале, следующем за интервалом безотказной работы

$$p_6(t / T) = 1 - q(t / T) = \frac{p_6(T + t)}{p_6(t)} ; \quad (7)$$

– интенсивности отказов

$$\lambda(T) = \frac{\omega(T)}{p_6(T)}, T \geq 0 ; \quad (8)$$

– учета η – случайной величины вероятности восстановления $P_b(t)$ и невозможности

$$q_b(t) = p(\eta > t) = 1 - P_b(t), \quad (9)$$

рассматриваемых элементов на заданном интервале времени Δt :

– плотности распределения времени восстановления или частоты восстановления

$$\omega_b(t) = \frac{dp_b(t)}{dt}, t \geq 0 ; \quad (10)$$

– среднее значение и дисперсию длительности восстановления

$$m_k = \int_0^{\infty} t^k \omega_b(t) dt = k . \quad (11)$$

Используя (1)–(11), а также и другие показатели, разработанные для оценки всей системы в целом, после получения экспериментальных данных можно оценить, как будет вести себя разработанная система в целом. Однако остается открытым вопрос о влиянии на все указанные показатели работоспособности отдельных элементов, из которых состоит система. В частности, практически невозможно получить численные значения изменения работоспособности систем с ПР для систем с неизменной нагрузкой (системы, у которых при отказе элементов резервной группы нагрузка на элементы не меняется) и систем с перераспределением нагрузки (системы, у которых при отказе хотя бы одного элемента резервной группы изменяется нагрузка на элементы, оставшиеся исправными).

Второй метод оценки показателей надежности рассматриваемой системы заключается в смысловом описании возможных ситуаций и разработки выводов о том, как должна работать систе-

ма [17]. Например, указывается, что при АР система проектируется так, чтобы при появлении отказа элемента резервной группы она перестроилась и восстановила работоспособность. Система должна активно реагировать на отказ. АР осуществляется с помощью переключателей, которые отключают отказавший элемент и включают исправный. С целью более детальных рекомендаций системы с АР до появления отказа резервные элементы по условиям работы делят на:

- системы с нагруженным резервом, когда все элементы находятся в одинаковых условиях;
- системы с облегченным резервом, когда резервные элементы находятся в облегченных условиях;
- системы с ненагруженным резервом, когда резервные элементы включаются в работу только после отказа рабочего элемента.

Резервирование осуществляется с помощью различных видов резервированных схем:

- общее резервирование;
- раздельное резервирование;
- резервирование с целой и дробной кратностью;
- скользящее резервирование;
- автономное резервирование.

Считается, что выигрыш, получаемый от резервирования, можно получить, рассчитав отношение показателей надежности резервированной аппаратуры к показателям надежности не резервированной аппаратуры в тестовых ситуациях после отказа одного или нескольких элементов.

Выигрыш, получаемый от резервирования, характеризуется отношением показателей K_1 и K_2 надежности резервированной аппаратуры к показателям надежности нерезервированной аппаратуры:

$$K_1 = \frac{Q(t)}{Q_m(t)}, \quad K_2 = \frac{T_m}{T_{ср6}}, \quad (12)$$

где $Q(t)$ – вероятность отказа системы устройства; $Q_m(t)$ – вероятность отказа резервированного устройства; $T_{ср6}$ – среднее время безотказной работы рассматриваемой системы; T_m – среднее время безотказной работы резервированного устройства.

Из этого следует, что выигрыш в надежности всегда увеличивается при всяком дроблении резерва, т.е. наиболее выгодным является поэлементное резервирование, но для этого требуется увеличение вспомогательного оборудования. А определение степени дробления резерва является задачей исследования операций, которая при правильной постановке позволит получить оптимальный результат.

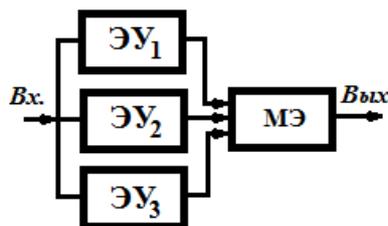


Рис. 1. Система с МЭ «2 из 3»

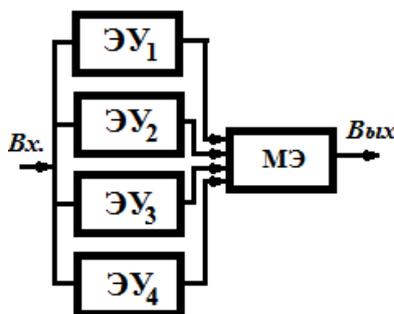


Рис. 2. Система с МЭ «3 из 4»

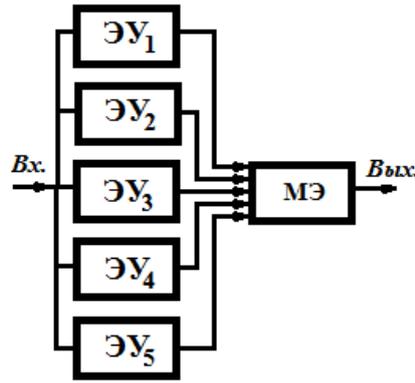


Рис. 3. Система с МЭ «3 из 5» (может быть настроена как «4 из 5»)

Для повышения надежности систем управления техническими объектами с использованием АР было предложено использовать системы мажоритарного контроля, где принятие управляющего решения осуществляется мажоритарным элементом (МЭ) методом голосования после сравнения выходных сигналов от всех элементов управления (УЭ_i). На практике из экономических соображений решение принимается после обработки результатов голосования по принципу однотипных решений, появившихся на выходе максимального числа параллельно подключенных элементов управления. Принято обозначать, в каких случаях МЭ принимает решение. Это «2 из 3» (рис. 1), «3 из 4» (рис. 2) и «3 из 5», которая может быть настроена «4 из 5» (рис. 3). Наибольшее распространение получила система «2 из 3», как требующая минимальных затрат при ожидаемых максимально хороших результатах. Развивая гипотезу о целесообразности использования систем АР, в литературе [18] сделано утверждение: «если переключатели отсутствуют, используя увеличение кратности резервирования, можно, в принципе, получить системы со сколь угодно высокой надежностью»¹, что на практике привело к доминированию систем с мажоритарным контролем при разработке и использовании комплексов по управлению техническими объектами практически во всех ответственных АСУ ТП: в энергетике, в космосе и других отраслях народного хозяйства. При этом надежности «переключателей» и смежные с ними системы оказались мало изучены [19].

Третий метод оценки показателей надежности рассматриваемой системы основан на расчете основных показателей рассматриваемой системы, исходя из показателей всех элементов, входящих в рассматриваемую систему. Для упрощения в дальнейшем будем рассматривать системы релейной защиты (С_{РЗ}), выдающих на выход «0» при отсутствии аварийной ситуации на защищаемом энергообъекте и «1» – при появлении аварийной ситуации на защищаемом энергообъекте [20].

Ранее основатель Рижской школы релейной защиты В. Л. Фабрикант, рассматривая изменение вероятностей безотказной и ошибочной работы систем из устройств релейной защиты (С_{РЗ}), предложил гипотезу расчета состояний, в которых может находиться как один элемент релейной защиты (Э_{РЗ}), так и С_{РЗ} [1]. По предложенной им гипотезе, число возможных состояний Э_{РЗ} и С_{РЗ} может быть оценено как работоспособность P_p и как отказ P_o . Соответственно, P – полная вероятность одной Э_{РЗ} будет

$$P = P_p + P_o, \tag{13}$$

а для системы из нескольких С_{РЗ}, когда входы двух и более Э_{РЗ} соединены, а их выходы объединены через решающий элемент (РЭ) (рис. 4), полная вероятность P_c будет

$$P_c = P_{c_p} + P_{c_o}. \tag{14}$$

Для такой системы для расчета вероятностей работоспособности P_{c_p} и ошибочной работы P_{c_o} предложено возвести в соответствующую степень (13), при этом показатель степени соответствует числу объединяемых Э_{РЗ}. Так, при объединении двух Э_{РЗ}

$$P_c = (P_p + P_o)^2 = P_p^2 + 2P_pP_o + P_o^2. \tag{15}$$

¹ Дружинин Г. В. Надежность автоматизированных систем. Москва : ЭНЕРГИЯ, 1977. С. 285.

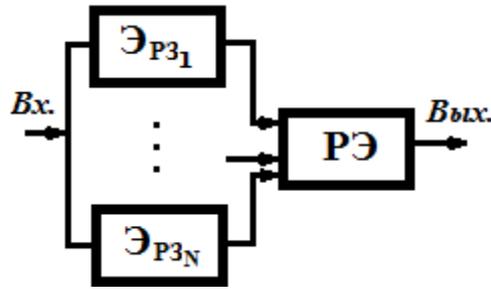


Рис. 4. Система, в которой может быть два и более \mathcal{E}_{P3} , с общим входом и выходами, объединенными через РЭ

Таким образом, вероятность работоспособности системы из двух элементов будет

$$P_{Pc} = P_p^2, \tag{16}$$

а вероятность появления ошибочных ситуаций будет

$$P_{oc} = 2P_p P_o + P_o^2. \tag{17}$$

Из понятия вероятности следует, что $0 \leq PP \leq 1$, тогда при объединении двух или нескольких \mathcal{E}_{P3} в C_{P3}

$$P_{Pc} < P_p. \tag{18}$$

Следовательно, на практике АР не имеет смысла.

Однако этот вывод нарушают результаты натуральных экспериментов [13], показывающие, что в ряде случаев при объединении \mathcal{E}_{P3} в систему (в том числе и из двух \mathcal{E}_{P3}) с использованием в качестве РЭ элемента «И» (рис. 5), а в ряде случаев и с использованием в качестве РЭ элемента «ИЛИ» (рис. 6) получаем результат, опровергающий (18).

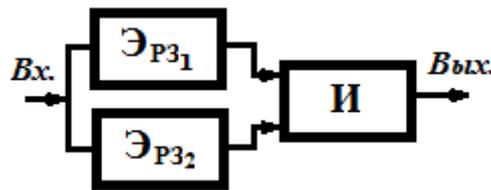


Рис. 5. Система, объединяющая два \mathcal{E}_{P3} , с общим входом и выходами, объединенными с помощью элемента «И»

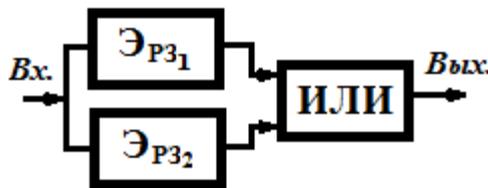


Рис. 6. Система, объединяющая два \mathcal{E}_{P3} , с общим входом и выходами, объединенными с помощью элемента «ИЛИ»

Анализ гипотезы, предложенной Л. В. Фабрикантом, показал, что в ней есть два неверных утверждения. Во-первых, надо рассматривать две ошибочные ситуации: несрабатывание (вероятность появления ситуации «несрабатывание» P_n) и ложное срабатывание (вероятность появления ситуации «ложное срабатывание» P_d). Во-вторых, надо рассматривать последствия ошибочной ситуации для защищаемого объекта.

Таким образом, для рассматриваемой системы P_c

$$P_c = P_p + P_n + P_d. \tag{19}$$

Тогда, модифицируя гипотезу Л. В. Фабриканта:

$$P_c = (P_p + P_n + P_l)^2 = P_p^2 + P_n^2 + P_l^2 + 2P_p P_n + 2P_p P_l + 2P_n P_l. \quad (20)$$

При анализе (20) для вывода формулы, определяющей вероятность появления ситуации «несрабатывание для системы» P_{nc} , и для вывода формулы, определяющей вероятность появления ситуации «ложное срабатывание для системы», P_{lc} в отличие от гипотезы, предложенной Л. В. Фабрикантом, необходимо учитывать, какую из систем (рис. 5) или (рис. 6) будем использовать. Система со схемой «И» оказывается нечувствительна к отказу, квалифицированному как «ложное срабатывание» одного из \mathcal{E}_{p3} , а система со схемой «ИЛИ» оказывается нечувствительна к отказу, квалифицированному как «несрабатывание» одного из \mathcal{E}_{p3} .

Таким образом, для системы из двух \mathcal{E}_{p3} со схемой «И» вероятность работоспособности системы

$$P_{Pc} = P_p^2 + 2P_p P_l. \quad (21)$$

Вероятность несрабатывания

$$P_{nc} = P_n^2 + 2P_p P_n + 2P_n P_l. \quad (22)$$

Вероятность ложного срабатывания

$$P_{lc} = P_l^2. \quad (23)$$

Для системы из двух \mathcal{E}_{p3} со схемой «ИЛИ» вероятность работоспособности системы

$$P_{Pc} = P_p^2 + 2P_p P_n. \quad (21)$$

Вероятность несрабатывания

$$P_{nc} = P_n^2. \quad (22)$$

Вероятность ложного срабатывания

$$P_{lc} = P_l^2 + 2P_p P_l + 2P_n P_l. \quad (23)$$

Вычислив возможные значения как разность между соответствующими вероятностями, описывающими нахождение системы из двух \mathcal{E}_{p3} в соответствующей ситуации, и вероятностью, описывающей нахождение одного элемента \mathcal{E}_{p3} в такой же ситуации [21]

$$\Delta P_{Pc} = P_{Pc} - P_p, \quad (24)$$

$$\Delta P_{nc} = P_{nc} - P_n, \quad (25)$$

$$\Delta P_{lc} = P_{lc} - P_l, \quad (26)$$

получаем, что в ряде случаев имеем положительное ΔP_{Pc} .

Если в соответствии с модифицированной гипотезой рассчитаем вероятности, описывающие систему из трех \mathcal{E}_{p3} , как с схемой «И», так и с схемой «ИЛИ», не получим положительного ΔP_{Pc} (при выполнении расчетов по формуле (24)).

Заключение

Целесообразность активного резервирования неочевидна.

Расчеты показывают, что при параллельном объединении трех \mathcal{E}_{p3} и более ΔP_{Pc} меньше, чем P_p , рассчитанная для одного \mathcal{E}_{p3} , что ставит под сомнение целесообразность активного резервирования более двух элементов, в том числе объединенных с помощью мажоритарного элемента.

Сделанный ранее вывод, «если переключатели отсутствуют, используя увеличение кратности резервирования, можно, в принципе, получить системы с сколь угодно высокой надежностью» [18, с. 285], не подтверждается результатами расчетов.

Библиографический список

1. *Prokopenko, N. N.* Architecture of the microwave differential operating amplifiers with paraphrase output / N. N. Prokopenko, P. S. Budyakov, A. I. Serebryakov // International Conference on Signals and Electronic Systems, ICSES'10 Conference Proceeding. sponsors: Rector of Silesian University of Technology, Polish Ministry of Science and Higher Education, Gliwice City Mayor, Evatronix S.A., 2010. – P. 165–168.
2. *Хачатуров, С. Л.* Система противоаварийной защиты печей, устойчивая к ложным остановкам / С. Л. Хачатуров, М. Б. Шехтман, И. И. Натхо // Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт. – 2006. – № 6. – С. 48–49.
3. *Маликов, О. Б.* Склады промышленных предприятий. Справочник / О. Б. Маликов, А. Я. Малкович ; под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. О. Б. Маликова. – Ленинград : Машиностроение, 1986. – 672 с.
4. *Gerasimenko, A.* A new faults blocking method for out-of-step protection / A. Gerasimenko, K. Ivanov, V. Kislyukov, V. Roganov // Proceedings of 2017 IEEE East-West Design and Test Symposium, EWDTTS 2017 November 2017, Article number 81100452017 IEEE East-West Design and Test Symposium, EWDTTS 2017; Novi Sad; Serbia; 27 September 2017 through 2 October 2017; Category number CFP17DTW-ART; Code 132504.
5. *Prokopenko, N. N.* The bifet-technology voltage analog multipliers based on the radiation resistant abmc «Integral» / N. N. Prokopenko, A. I. Serebryakov, D. N. Konev // International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON-2009; Proceedings International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON-2009. sponsors: Russian Found. Basic Res. RBFR proj. 09-07-06004, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Radar R and D. – Tomsk, 2009. – P. 244–248.
6. *Прошин, А. И.* Комплексная автоматизация тепловых сетей как наиболее результативный инструмент повышения эффективности теплоснабжения / А. И. Прошин, М. Б. Шехтман, Д. В. Ладугин // Автоматизация и ИТ в энергетике. – 2017. – № 5 (94). – С. 11–15.
7. Mathematical modeling of heterogeneous structure dynamics of an electronic block under applied shock / D. V. Artamonov, A. N. Litvinov, N. K. Yurkov, I. I. Kochegarov, A. V. Lysenko // Proceedings – 2018 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology, USBEREIT 2018. – Yekaterinburg, 2018. – P. 224–228.
8. *Фабрикант, В. Л.* О применении теории надежности к оценке устройств релейной защиты / В. Л. Фабрикант // Электричество. – 1965. – № 9. – С. 36–44.
9. *Роганов, В. Р.* К вопросу о расчете показателей надежности систем активного резервирования / В. Р. Роганов, Э. В. Роганова, А. В. Герасименко // Цифровизация агропромышленного комплекса : сборник науч. ст. – Пенза, 2018. – С. 217–220.
10. *Майоров, С. А.* ЭВМ Справочник по конструированию / С. А. Майоров, С. А. Крутовских, А. А. Смирнов. – Москва : Советское радио, 1975. – 504 с.
11. *Гемст, В. К.* Применение устройств функционального диагноза для борьбы с последствиями отказов микропроцессорных систем релейной защиты / В. К. Гемст, В. Р. Роганов // Известия Академии наук СССР. Энергетика и транспорт. – 1984. – № 2. – С. 3.
12. *Базовский, И.* Надежность / И. Базовский. – Москва : Мир, 1965. – 374 с.
13. *Гемст, В. К.* Синтез микропроцессорных систем локальной автоматики с устройством функционального контроля / В. К. Гемст, В. Р. Роганов // Микропроцессорные системы контроля и управления : сб. науч. тр. – Рига : Рижск. политех. ин-т, 1984. – С. 22–29.
14. *Матвеевский, В. Р.* Надежность технических систем : учеб. пособие / В. Р. Матвеевский. – Москва : Московский государственный институт электроники и математики, 2002. – 113 с.
15. *Острейковский, В. А.* Теория надежности : учебник / В. А. Острейковский. – Москва : Высш. шк., 2003. – 463 с.
16. *Белевцев, А. Т.* Монтаж радиоаппаратуры и приборов / А. Т. Белевцев. – Москва : Высш. шк., 1975. – 424 с.
17. *Собакин, Е. Л.* Цифровая схемотехника : учеб. пособие / Е. Л. Собакин. – Томск : Изд-во ТПУ, 2002. – Ч. I. – 160 с.
18. *Дружинин, Г. В.* Надежность автоматизированных систем / Г. В. Дружинин. – Москва : Энергия, 1977. – 536 с.
19. Метод организации информационного обеспечения системы мониторинга и контроля неисправностей электрооборудования и качества электропитания в техническом комплексе промышленного назначения / М. Ю. Михеев, Е. Н. Мещерякова, В. Р. Роганов, А. В. Герасименко, Д. Г. Туркин, О. Н. Ясаревская // Современные технологии и развитие политехнического образования. – Пенза, 2016. – С. 383–386.

20. Острейковский, В. А. Анализ работоспособности и надежности мобильных буровых комплексов по статистическим данным при эксплуатации в условиях Западной Сибири / В. А. Острейковский, П. В. Антонюк, А. В. Антонюк // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 3 (22). – С. 23–31.
21. Михайлов, В. С. Оценка вероятности безотказной работы по результатам испытаний, не давших отказы / В. С. Михайлов // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 2 (19). – С. 56–60.

References

1. Prokopenko N. N., Budyakov P. S., Serebryakov A. I. *International Conference on Signals and Electronic Systems, ICSES'10 Conference Proceeding. sponsors: Rector of Silesian University of Technology, Polish Ministry of Science and Higher Education, Gliwice City Mayor, Evatronix S.A.*, 2010, pp. 165–168.
2. Khachaturov S. L., Shekhtman M. B., Natkho I. I. *Neftepererabotka i neftekhimiya. Nauchno-tekhnicheskie dostizheniya i peredovoy opyt* []. 2006, no. 6, pp. 48–49. [In Russian]
3. Malikov O. B., Malkovich A. Ya. *Sklady promyshlennykh predpriyatiy. Spravochnik* []. Leningrad: Mashinostroenie, 1986, 672 p. [In Russian]
4. Gerasimenko A., Ivanov K., Kislyukov V., Roganov V. *Proceedings of 2017 IEEE East-West Design and Test Symposium, EWDTS 2017 November 2017, Article number 81100452017 IEEE East-West Design and Test Symposium, EWDTS 2017; Novi Sad; Serbia; 27 September 2017 through 2 October 2017; Category number CFP17DTW-ART; Code 132504.*
5. Prokopenko N. N., Serebryakov A. I., Konev D. N. *International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON-2009; Proceedings International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON-2009. sponsors: Russian Found. Basic Res. RBFR proj. 09-07-06004, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Radar R and D.* Tomsk, 2009, pp. 244–248.
6. Proshin A. I., Shekhtman M. B., Ladugin D. V. *Avtomatizatsiya i IT v energetike* []. 2017, no. 5 (94), pp. 11–15. [In Russian]
7. Artamonov D. V., Litvinov A. N., Yurkov N. K., Kochegarov I. I., Lysenko A. V. *Proceedings – 2018 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology, USBEREIT 2018.* Yekaterinburg, 2018, pp. 224–228.
8. Fabrikant V. L. *Elektrichestvo* []. 1965, no. 9, pp. 36–44. [In Russian]
9. Roganov V. R., Roganova E. V., Gerasimenko A. V. *Tsifrovizatsiya agropromyshlennogo kompleksa: sbornik nauchnykh statey* []. Penza, 2018, pp. 217–220. [In Russian]
10. Mayorov S. A., Krutovskikh S. A., Smirnov A. A. *EVM Spravochnik po konstruirovaniyu* []. Moscow: Sovetskoe radio, 1975, 504 p. [In Russian]
11. Gemst V. K., Roganov V. R. *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Energetika i transport* []. 1984, no. 2, p. 3. [In Russian]
12. Bazovskiy I. *Nadezhnost'* []. Moscow: Mir, 1965, 374 p. [In Russian]
13. Gemst V. K., Roganov V. R. *Mikroprotsessornye sistemy kontrolya i upravleniya: sb. nauch. tr.* []. Riga: Rzhsk. politekh. in-t, 1984, pp. 22–29. [In Russian]
14. Matveevskiy V. R. *Nadezhnost' tekhnicheskikh sistem: ucheb. posobie* []. Moscow: Moskovskiy gosudarstvennyy institut elektroniki i matematiki, 2002, 113 p. [In Russian]
15. Ostreykovskiy V. A. *Teoriya nadezhnosti: uchebnyk* []. Moscow: Vyssh. shk., 2003, 463 p. [In Russian]
16. Belevtsev A. T. *Montazh radioapparatury i priborov* []. Moscow: Vyssh. shk., 1975, 424 p. [In Russian]
17. Sobakin E. L. *Tsifrovaya skhemotekhnika: ucheb. posobie* []. Tomsk: Izd. TPU, 2002, part I, 160 p. [In Russian]
18. Druzhinin G. V. *Nadezhnost' avtomatizirovannykh sistem* []. Moscow: Energiya, 1977, 536 p. [In Russian]
19. Mikheev M. Yu., Meshcheryakova E. N., Roganov V. R., Gerasimenko A. V., Turkin D. G., Yasarevskaya O. N. *Sovremennye tekhnologii i razvitie politekhnicheskogo obrazovaniya* []. Penza, 2016, pp. 383–386. [In Russian]
20. Ostreykovskiy V. A., Antonyuk P. V., Antonyuk A. V. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* []. 2018, no. 3 (22), pp. 23–31. [In Russian]
21. Mikhaylov V. C. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* []. 2017, no. 2 (19), pp. 56–60. [In Russian]

Роганов Владимир Робертович

кандидат технических наук, профессор,
кафедра информационных технологий и систем,
Пензенский государственный
технологический университет
(440039, Россия, г. Пенза,
проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11)
E-mail: Vladimir_roganov@mail.ru

Roganov Vladimir Robertovich

candidate of technical sciences, professor,
sub-department of information
technologies and systems,
Penza State Technological University
(440039, 1a/11 Baydukov passage / Gagarin street,
Penza, Russia)

Гришко Алексей Константинович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: alexey-grishko@rambler.ru

Кочегаров Игорь Иванович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: kipra@mail.ru

Grishko Alexey Konstantinovich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of radio equipment design
and production,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Kochegarov Igor Ivanovich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of radio equipment design
and production,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Роганов, В. Р. Три подхода к оценке работоспособности систем активного резервирования / В. Р. Роганов, А. К. Гришко, И. И. Кочегаров // Надежность и качество сложных систем. – 2019. – № 2 (26). – С. 9–18. – DOI 10.21685/2307-4205-2019-2-2.

Н. А. Северцев, А. В. Бецков, А. Н. Дарьина

МЕТОДЫ И МОДЕЛИ СОЗДАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

N. A. Severtsev, A. V. Betskov, A. N. Dar'ina

METHODS AND MODELS OF CREATING AUTOMATED CONTROL MEANS TO IMPROVE SAFETY FUNCTIONING OF TECHNICAL SYSTEMS

Аннотация. При проектировании технических систем их разработчик, как правило, использует следующие методы на эвристическом уровне. Первый метод предполагает путь отсчета «от объекта контроля», когда разработчик на основании структурных, функциональных, принципиальных и других схем исследует создаваемый объект и контроль его параметров при функционировании объекта, а затем выбирает совокупность параметров и характеристики сигналов во временном диапазоне. Иначе, формирует измерительные задачи, для решения которых определяется номенклатура средств измерений, обеспечивающих их совместное функционирование под управлением ЭВМ в составе средств контроля и автоматизированного контроля. Второй метод предполагает «движение» от штатных средств измерений параметров создаваемой системы, иначе – опосредованное изучение объекта (системы) к замене ранее используемой контрольно-измерительной аппаратуры. Здесь имеется в виду, что оба метода на основании технической эксплуатационной документации позволяют создать алгоритмы контроля, диагностики и представление необходимой информации оператору. Первый метод наиболее эффективен для измерений при создании технических систем и их оборудования и получил широкую реализацию. Второй метод можно использовать при замене штатных средств измерений на более современные. Построение средств контроля предполагает комплексное решение задач структурной и параметрической оптимизации. Структурная оптимизация средств контроля, создаваемых на базе ЭВМ и приборов-модулей, объединенных интерфейсами, связана с варьированием их компонентами: типами и вариантами приборов-модулей (модульно-контрольно-измерительное оборудование); типами, последовательностью и вариантами технологических операций, необходимых при контроле и диагностировании объектов контроля. В статье приводится математическое описание моделей создания автоматизированных средств контроля для повышения безопасности функционирования технических систем на примере радиоэлектронного оборудования.

Ключевые слова: матрицы, уровни, управление, вероятность, показатель, гарантированные оценки.

Abstract. When designing technical systems, their developer, as a rule, uses the following methods at a heuristic level. The first method assumes the path of reference “from the object of control”, when the developer, on the basis of structural, functional, principal and other schemes, examines the created object and controls its parameters during the operation of the object, and then selects a set of parameters and signal characteristics in the time range. Otherwise, it forms measurement tasks, for the solution of which the nomenclature of measuring instruments is determined, ensuring their joint operation under the control of a computer as part of control and automated control devices (SC-ASK). The second method assumes “movement” from the standard means of measuring the parameters of the system being created, otherwise – indirectly studying the object (system) and replacing the previously used test equipment. Here it is meant that both methods on the basis of technical operational documentation allow creating control algorithms, diagnostics and the presentation of necessary information to the operator. The first method is most effective for measuring the creation of technical systems and their equipment and has been widely implemented. The second method can be used when replacing standard measuring instruments with more modern ones. The article provides a mathematical description of the creation models of automated controls to improve the safety of the operation of technical systems on the example of electronic equipment.

Keywords: matrices, levels, control, probability, exponent, guaranteed estimates.

При разработке или модернизации радиоэлектронного оборудования технических систем (особенно транспортных) возникает задача, связанная с выбором множества объектов контроля (ОК) и множества средств контроля (СК). Для решения этой задачи требуется произвести разделение ОК на классы по техническим характеристикам, а затем для сформированного класса объектов контроля осуществить в соответствии с их характеристиками подбор необходимых средств контроля.

Применение процедуры классификации множества ОК дает возможность осуществить компактное формирование пространства технических признаков ОК по классам. Это в свою очередь способствует устранению функциональной и параметрической избыточности синтезируемых наборов СК для сформированных классов ОК.

Таким образом, классификация ОК заключается в том, чтобы отнести каждый предъявляемый объект к тому или иному классу. Классы могут быть образованы в процессе применения решающих правил ко всему количеству рассматриваемых объектов, принадлежность которых к определенному классу заранее не известна.

Методы классификации ОК определяются решающим правилом и метрическим пространством, используемыми исследователями или разработчиками технических систем. Наиболее широко в настоящее время используются метрические пространства с метриками Евклида, Манхэттена, Чебышева. Чем меньше метрическое расстояние между двумя классами ОК, тем больше сходство между ними [1, 2].

Технические характеристики различных ОК и особенно РЭО, как правило, представлены диапазонами характеристик, соответствующих всевозможным проекциям на различные плоскости разделяемого на классы многомерного метрического пространства. При формировании решающей функции на выбранном метрическом пространстве, обеспечивающей разделение множества ОК на требуемые классы, возникает неопределенность, связанная с тем, что диапазоны технических характеристик ОК могут пересекаться, не пересекаться или быть равными. Признаки разделяемого множества ОК на классы, как правило, представляются списками (наборами диапазонов) технических характеристик, а решающая функция задается на основе меры сравнения списков.

Для определения меры сходства или различия между списками, состоящими из технических характеристик, из всех известных работ наибольшее внимание заслуживает метод Кендала [3, 4]. Для двух списков $X_i^T = \{x_{i1}, \dots, x_{in}, \dots, x_{iN}\}$ и $X_j^T = \{x_{j1}, \dots, x_{jn}, \dots, x_{jN}\}$ расстояние по Кендалу вычисляется по формуле

$$d(X_i^T, X_j^T) = 1 - \frac{2}{N(N-1)} \sum_{p=1}^{N-1} \sum_{\substack{h=1, \\ k=h+1}}^{N-p} K_{hk}^i K_{hk}^j, \tag{1}$$

где N – количество элементов в списках X_i^T и X_j^T ; K_{hk}^i – коэффициент парного сравнения следования элементов $\{x_{ik}, x_{ih}\}$ в списке X_i^T ; K_{hk}^j – коэффициент парного сравнения следования элементов $\{x_{jk}, x_{jh}\}$ в списке X_j^T ; k и h – переменные, определяющие в каждом списке пары элементов, $h = 1, 2, \dots, n, \dots, N-1$, $k = 1, 2, \dots, n, \dots, N$, $h < k$, $p = 1, 2, \dots, N-1$.

Коэффициенты сравнения следования элементов списков K_{hk}^i , K_{hk}^j определяются по формулам

$$K_{hk}^i = \begin{cases} +1, & x_{ih} > x_{ik}, \\ -1, & x_{ih} < x_{ik}, \\ 0, & x_{ih} = x_{ik} \end{cases} \text{ и } K_{hk}^j = \begin{cases} +1, & x_{jh} > x_{jk}, \\ -1, & x_{jh} < x_{jk}, \\ 0, & x_{jh} = x_{jk}. \end{cases}$$

Если компоненты обоих списков X_i^T и X_j^T были упорядочены однотипно, то $K_{hk}^i = K_{hk}^j$, при этом результат суммирования этих коэффициентов равен половине числа размещений N элементов по 2, т.е. $\frac{N(N-1)}{2}$. В этом случае расстояние между списками согласно (1) $d(X_i, X_j) = 0$. Это соответствует тому, что оба списка попадают в один класс.

Если два списка идентичны и один из них относительно другого упорядочен в обратном направлении, то в соответствии с методом Кендала принимается решение о том, что списки различны,

т.е. происходит ошибочное разделение рассматриваемых списков на классы. Это объясняется тем, что метод Кендала обеспечивает сравнение двух списков X_i^T и X_j^T только по порядкам следования элементов в этих списках. Он не позволяет сравнивать между собой поэлементно вербальные и количественные характеристики списков и не может применяться в том случае, когда количественные характеристики задаются в виде диапазонов численных значений, которые могут пересекаться, не пересекаться, быть равными между собой или включаться друг в друга. Поэтому возникает необходимость разработать новый метод для решения задач классификации ОК, признаки которых представляются списками (наборами диапазонов) технических характеристик, а сейчас рассмотрим методы структурной и параметрической оптимизации выбора наилучшего (по совокупности) технико-экономического варианта.

При проектировании автоматизированных средств контроля и диагностирования или формировании набора СК решается основной комплекс задач, который связан с выбором наилучшего по совокупности технико-экономических показателей варианта. Эти задачи имеют несколько разновидностей, которым соответствуют три уровня оптимизации. Первый уровень оптимизации состоит в выборе наилучшей технической идеи или принципа действия проектируемого объекта; второй – в поиске наилучшей структуры или схемы в рамках выбранного принципа действия; третий – в определении наилучших значений параметров для выбранной структуры (схемы).

Разделение на три уровня является условным, и строгой границы между ними провести невозможно. Задачи первого уровня характерны для этапов внешнего проектирования и решаются с использованием подходов и методов эвристического программирования. Задачи второго и третьего уровней ориентированы на этапы внутреннего проектирования, которые соответственно являются задачами структурной и параметрической оптимизации [5].

Построение средств контроля предполагает комплексное решение задач структурной и параметрической оптимизации. Структурная оптимизация СК, создаваемых на базе ЭВМ и приборомодулей, объединенных интерфейсами, связана с варьированием их компонентами: типами и вариантами приборомодулей (модульно-контрольно-измерительное оборудование – МКИО); типами, последовательностью и вариантами технологических операций, необходимых при контроле и диагностировании объектов контроля, в нашем случае – радиоэлектронного оборудования [6, 7].

Каждый вариант СК/АСК – W_g формируется из элементов A_g и H_k , где элемент A_g представляет собой g -ю аппаратную часть – базовую структуру СК/АСК, состоящую из совокупности приборомодулей, H_k – выполняемые технологические операции.

Совокупность A_g и взаимосвязей между ними характеризуют структуру СК, а задача оптимизации состоит в выборе на множестве комбинаций элементов W_g варианта $W_{(opt)g}$, оптимального в смысле заданных технических и технико-экономических показателей (критериев).

Возможности изменения перечисленных компонент определяются разнообразием двух множеств A , H и связей между ними.

Для базовых структур СК: $A_g \in A$, $g = 1, \dots, G$, где « \in » – знак «принадлежности»; A – множество вариантов базовых структур СК; G – множество индексов наименований.

Для технологических операций: $H_k \in H$, $k = 1, \dots, K$, где H – множество технологических операций; K – множество индексов наименований.

Под вариантом СК будем понимать совокупность элементов $A_g \in A$, $H_k \in H$. В этом случае вариант СК W_g удобно рассматривать в виде произведения на непустых множествах A и H , $W \in A \times H$. Здесь

$$A = (A_1, \dots, A_g, \dots, A_G); H = (H_1, \dots, H_k, \dots, H_K); g = 1, \dots, G; k = 1, \dots, K.$$

Обозначим совместную пару элементов ($A_g \times H_k = W_g$), $g = 1, \dots, G$. Тогда множество W вариантов СК имеет вид $W = (W_1, \dots, W_g, \dots, W_G)$. Учитывая, что последовательность элементов H_k задается технологиями выполнения регламентных работ и ремонта (технологическими операциями), количество и порядок выполнения которых заранее известны, то при $k = g$ H_k соответствует вари-

анту A_g . Следовательно, если во множестве W рассматривать только элементы H , то задача оптимизации сводится к задаче определения оптимального набора технологических операций, выполняемых вариантом A_g . Если во множестве W рассматривать только элементы A , то задача оптимизации сводится к задаче определения оптимальной структуры СК для выполнения соответствующих технологических операций.

Заметим, что задача структурной оптимизации в такой постановке характеризуется рядом особенностей:

1. Необходимость формирования вариантов СК W_g путем варьирования реализациями элементов A_g, H_k как внутри самих множеств A и H , так и между собой приводит к комбинаторной неопределенности в выборе оптимального варианта $W_{(opt)g}$.

2. Множественность технико-экономических требований к системе $W_{(opt)g}$ по элементу A_g , что является причиной неопределенности в выборе цели оптимизации.

3. Значения технических и технико-экономических показателей по элементу A_g связаны с вариантом структуры W_g и вычисляются по математической зависимости параметрического типа только для определенной комбинации $W = (W_1, \dots, W_g, \dots, W_G)$ элементов W_g . Переход к определению зависимости параметрического типа непосредственно через варьируемые компоненты A_g структуры, а не их комбинации $W = (W_1, \dots, W_g, \dots, W_G)$, $g = 1, \dots, G$ приводит к неопределенности математического описания элемента комбинации W_g .

При выбранной структуре W_g параметрическая оптимизация состоит в поиске оптимального вектора параметров технических и технико-экономических показателей, при котором обеспечивается выполнение заданных требований к W_g варианту СК. Изменение каждого из оптимизируемых параметров технико-экономических показателей W_g варианта ограничено условиями оптимальности по каждому из показателей $X_{g,1min} \leq X_{g,p} \leq X_{g,pmax}$, $g = 1, \dots, G$, $p = 1, \dots, P$, где P – количество показателей, а требования задаются в форме экстремальных условий (например, минимума) $X_{g,p} \rightarrow \text{Minimize}$, которые принято называть критериями (целями) оптимизации, или в форме граничных условий $X_{g,p} \leq O_p$, где $O = (O_1, \dots, O_p, \dots, O_P)$ – ограничения на показатели $X_{g,p}$, $p \in P$.

Наиболее распространенными являются следующие задачи параметрической оптимизации [6–8]:

– без ограничений $X_{g,p} \rightarrow \text{Minimize}$;

– математического программирования $X_{g,p} \rightarrow \text{Minimize}$, $X_{g,1min} \leq X_{g,p} \leq X_{g,pmax}$.

Известные [5, 9] универсальные методы структурной оптимизации в качестве основного признака учитывают только комбинаторный характер формирования W_g . Поэтому на их основе могут быть решены только частные задачи выбора оптимальной базовой структуры СК.

Одним из подходов к решению подобных задач является полный перебор [8]. Он предлагает предварительный синтез вариантов базовых структур СК A_g , которые можно получить путем формирования всех возможных комбинаций элементов из приборов-модулей. Для генерации множества возможных вариантов используют, как правило, метод морфологического ящика (таблиц фрагментов, которые могут входить в состав проектируемой системы, позволяющей формировать их допустимые комбинации). Положительной стороной полного перебора является просмотр всех разрешенных комбинаций, что обеспечивает высокую надежность принятия оптимального решения.

Рассмотренный подход имеет недостатки, которые накладывают ограничение на его применение.

Во-первых, отсутствие математических моделей, учитывающих системные связи между вариантом СК и технологическими операциями, требует формализации разрешенных комбинаций для каждой частной задачи, что существенно увеличивает затраты на предварительную подготовку автоматизированного решения.

Во-вторых, полное число вариантов W_g оказывается достаточно большим, и машинное время, необходимое для их генерирования, становится неприемлемым.

В-третьих, в случае множества $O = (O_1, \dots, O_p, \dots, O_p)$ технико-экономических требований поиск оптимальной системы приводит к дополнительным затратам на повторный перебор и анализ в области компромиссов.

Одним из подходов, направленных на ограничение числа предварительно синтезируемых вариантов, является сокращенный перебор на основе случайного поиска [8, 10]. При разработке математических моделей структурной оптимизации СК будет невозможно построить целенаправленные поисковые процедуры, прогнозирующие положение системы в пространстве показателей, что увеличивает надежность неполного перебора. Кроме того, в этом случае удастся обосновать условие останова неуправляемого процесса случайного поиска. Для реализации структурной оптимизации СК с применением комбинаторных подходов можно использовать методы дискретного программирования [11]. Однако необходимость учета системных связей, совместного влияния нескольких типов неопределенностей при выборе структуры СК приводит к NP -полным задачам дискретной оптимизации, для которых получение точного решения $W_{(opt)g}$ является неэффективным, поскольку трудоемкость поиска экспоненциально зависит от их размерности. Приближенные методы снижают надежность выбора оптимального варианта. Они позволяют определить только показатели единственного решения, при этом теряется возможность в ходе поиска обозревать группу доминирующих вариантов.

Таким образом, возникает необходимость разработки новых методов внешнего и внутреннего проектирования, последовательность и совокупность которых составила бы методику оптимального и рационального построения базовых структур СК в зависимости от выбранных критериев и ограничений на параметры системы, позволяющей обеспечить минимальную трудоемкость автоматизированного решения. Заметим, что предложенная ниже методика позволяет также осуществлять и оптимизацию набора технологических операций, однако с этой точки зрения она имеет перспективу.

Рассмотрим определенные соображения создания унифицированных базовых структур автоматизированных средств контроля технических систем.

Разработка СК/АСК, позволяющих обеспечить решение задач контроля и диагностирования группы (групп) ОК разнотипных технических систем, приводит к необходимости определения, в этом смысле, унифицированных базовых наборов СК с интерфейсами КОП или VXI (приборов на принципе модульно-контрольно-измерительного оборудования (МКИО)). Исходя из этого, при построении СК/АСК возникает задача, связанная с выбором для множества объектов контроля множества средств измерений. Задачу такого рода можно отнести к классу задач о покрытии исходного множества минимальным числом имеющихся подмножеств. Из теории комбинаторного анализа и дискретной математики известно, что задачи о покрытии являются NP -сложными и трудно разрешимыми вследствие проблемы Турана [12], обусловленной выбором минимальной системы подмножеств, покрывающих исходное множество. В нашем случае это усложняется еще и тем, что в качестве элементов покрываемого множества и покрывающих подмножеств выступают диапазоны технических характеристик ОК и приборов. При этом характерна следующая особенность: диапазоны характеристик одного типа (например, диапазоны частот), принадлежащие различным ОК, могут как перекрываться, так и не перекрываться или быть равными между собой. Решить задачу о покрытии методами линейного программирования также невозможно из-за указанной выше особенности и возникающей при этом неопределенности в размерности задачи линейного программирования (не определены количество и комбинации приборов).

Устранить проблему Турана можно, если свести задачу массового перебора к задаче перебора, где рассматриваются только те варианты решений, которые состоят из наименьшего, одинакового количества элементов покрывающих подмножеств (средств измерений). В этом случае получаемые варианты базовых структур СК/АСК имеют одинаковое количество приборов, что позволяет предложить новый метод решения задач многокритериальной оптимизации и дает возможность применить известные методы линейного программирования.

Методика построения унифицированных базовых структур АСК [10] базируется на моделях и состоит из следующих методов:

- классификации объектов контроля;
- формирования обобщенного объекта контроля;

- покрытия характеристик обобщенного объекта контроля характеристиками средств контроля;
- формирования вариантов наборов средств контроля;
- определения оптимального набора средств контроля;
- определения рационального набора средств контроля.

Более подробно об изложенных методах см. в работе [4].

Если рассматривать проблему классификации объектов контроля технических систем в самом общем виде, то ее можно сформулировать как задачу разработки процедуры, позволяющей разделять множество ОК по тем или иным признакам на классы. Для реализации этой процедуры разработаем модель классификации ОК РЭО (под ОК РЭО будем понимать и другие технические системы, имеющие подобные характеристики) по их вербальным признакам.

Пусть задано множество ОК РЭО $S_{PЭО}(r^T)$. Каждый ОК РЭО $S_{PЭО}^j(r^T) \in S_{PЭО}(r^T)$ характеризуется только набором r^T технических характеристик, где $j = 1, 2, \dots, J$ – общее количество ОК систем техники.

Тогда разделение $S_{PЭО}(r^T)$ на $CI_n(r^T)$ – классы ОК систем техники по наборам r^T отображается функцией

$$S_{i_1} : S_{PЭО}(r^T) \rightarrow \{CI_1(r^T), \dots, CI_n(r^T), \dots, CI_N(r^T)\}, \tag{2}$$

где $CI_n(r^T) \in S_{PЭО}(r^T)$, $n = 1, 2, \dots, N$ – общее количество образованных классов ОК на множестве $S_{PЭО}(r^T)$.

Функция разделения S_{i_1} множества $S_{PЭО}(r^T)$ на подмножества – классы ОК – $CI_n(r^T)$ задается рекуррентной формулой

$$CI_{n+1}(r^T) = \begin{cases} \emptyset, & S_{PЭО}(r^T) = \emptyset, \\ CI_n \not\subset S_{PЭО}(r^T), & S_{PЭО}(r^T) \neq \emptyset. \end{cases} \tag{3}$$

Образование очередного подмножества ОК технических систем $CI_n(r^T)$ можно описать следующим выражением

$$CI_n(r^T) = S_{PЭО}^K(r^T) + \sum_{j=1}^J b_j S_{PЭО}^j(r^T), \tag{4}$$

где b_j – булева переменная, управляющая включением или выключением ОК РЭО в класс (подмножество) $CI(r^T)$ и принимающая значение 1, если $S_{PЭО}^K(r^T) = S_{PЭО}^j(r^T)$ по набору r^T и 0 – в противном случае, $k \neq j$, $k \in J$. С учетом (2)–(4) модель классификации ОК РЭО примет следующий вид:

$$S_{i_1}(S_{PЭО}(r^T)) = \sum_{n=1}^{N-1} (CI_{n+1}(r^T) \cap CI_n(r^T) = \emptyset); \tag{5}$$

$$b_j = \begin{cases} 1, & S_{PЭО}^K(r^T) = S_{PЭО}^j(r^T), \\ 0, & S_{PЭО}^K(r^T) \neq S_{PЭО}^j(r^T), \end{cases} \tag{6}$$

где « $=$ » – знак равенства двух ОК технических систем по наборам признаков технических характеристик; « \neq » – знак неравенства двух ОК РЭО по наборам признаков технических характеристик; « \cap » – знак пересечения классов ОК РЭО $CI_n(r^T)$ по наборам признаков технических характеристик; $n = 1, 2, \dots, N$, $j = 1, 2, \dots, J$, $k \neq j$, $k \in J$, $S_{PЭО}^K(r^T) \in S_{PЭО}(r^T)$, $S_{PЭО}^j(r^T) \in S_{PЭО}(r^T)$.

Таким образом, модель (4)–(6) позволяет описать процесс разделения множества ОК РЭО $S_{PЭО}^K$ на классы (подмножества) ОК РЭО $CI_n(r^T)$.

Библиографический список

1. Фор, А. Восприятие и распространение образов / А. Фор ; под ред. Г. П. Катуса ; пер. с фран. А. В. Серединского. – Москва : Машиностроение, 1989 – 272 с.
2. Дюран, Б. Кластерный анализ / Б. Дюран ; под ред. А. Я. Боярского ; пер. с англ. Е. З. Демиденко. – Москва : Статистика, 1977. – 128 с.
3. Miclet, L. *Methods structurales pour la reconnaissance des formes* / L. Miclet. – Eyroeles Edit, 1984. – P. 9–11.
4. Michalsci, R. S. *Recent advance in data analysis* / R. S. Michalsci ; et. A. Diday. – North Holland Edit, 1984. – P. 9–11.
5. Фролов, В. Н. Автоматизированное проектирование технологических процессов и систем производства РЭС / В. Н. Фролов, Я. Е. Львович, А. П. Меткин. – Москва : Высш. шк., 1991. – 463 с.
6. Шипилов, В. В. Последовательная оптимизация базовых структур автоматизированных измерительных средств контроля / В. В. Шипилов // Науч. Сб. ГНИИ (Эра). – 2010. – № 8. – С. 215–221.
7. Шипилов, В. В. Об одном методе классификации объектов контроля радиоэлектронного оборудования / В. В. Шипилов // Контроль. Диагностика. – 2006. – № 7. – С. 56–59.
8. Пападимитриу, Х. Комбинаторная оптимизация. Алгоритмы и сложность : пер. с англ. / Х. Пападимитриу, К. Стайглиц. – Москва : Мир, 1985. – 512 с.
9. Шипилов, В. В. Системная модель, методология и адаптивный алгоритм построения унифицированных средств контроля радиоэлектронного оборудования / В. В. Шипилов. – Москва : РУДН, 2005. – 183 с.
10. Корбут, А. А. Дискретное программирование / А. А. Корбут, Ю. Ю. Филькинштейн. – Москва : Наука, 1969.
11. Тараканов, В. Е. Комбинаторные задачи и (0, 1)-матрицы / В. Е. Тараканов. – Москва : Наука, 1977.
12. Шипилов, В. В. Об одном подходе к решению задач многокритериальной оптимизации базовых структур средств и систем контроля РЭО / В. В. Шипилов // Контроль, диагностика. – 2006. – № 6. – С. 26–28.

References

1. For A. *Vospriyatie i rasprostranenie obrazov* [Perception and distribution of images]; transl. from French by A. V. Seredinskiy. Moscow: Mashinostroenie, 1989, 272 p. [In Russian]
2. Dyuran B. *Klasternyy analiz: per. s angl. E. Z. Demidenko* [Cluster analysis : translation from English E. Z. Demidenko]. Moscow: Statistika, 1977, 128 p. [In Russian]
3. Miclet L. *Methods structurales pour la reconnaissance des formes, Eyroeles Edit* [Structural methods for pattern recognition, Eyroeles Edit]. 1984, pp. 9–11.
4. Michalsci R. S. *Recent advance in data analysis*. North Holland Edit, 1984, pp. 9–11.
5. Frolov V. N., L'vovich Ya. E., Metkin A. P. *Avtomatizirovannoe proektirovanie tekhnologicheskikh protsessov i sistem proizvodstva RES* [Computer-aided design of technological processes and production systems of RES]. Moscow: Vyssh. shk., 1991, 463 p. [In Russian]
6. Shipilov V. V. *Nauch. Sb. GNII (Era)* [Scientific Collection of GNII (Era)]. 2010, no. 8, pp. 215–221. [In Russian]
7. Shipilov V. V. *Kontrol'. Diagnostika* [Control. Diagnostics]. 2006, no. 7, pp. 56–59. [In Russian]
8. Papadimitritsu Kh., Stayglits K. *Kombinatornaya optimizatsiya. Algoritmy i slozhnost': per. s angl.* [Combinatorial optimization. Algorithms and complexity : translation from English]. Moscow: Mir, 1985, 512 p. [In Russian]
9. Shipilov V. V. *Sistemnaya model', metodologiya i adaptivnyy algoritm postroeniya unifitsirovannykh sredstv kontrolya radioelektronnogo oborudovaniya* [System model, methodology and adaptive algorithm for the construction of unified means of control of electronic equipment]. Moscow: RUDN, 2005, 183 p. [In Russian]
10. Korbut A. A., Fil'kinshteyn Yu. Yu. *Diskretnoe programmirovaniye* [Discrete programming]. Moscow: Nauka, 1969. [In Russian]
11. Tarakanov V. E. *Kombinatornye zadachi i (0, 1)-matritsy* [Combinatorial problems and (0, 1)-matrices]. Moscow: Nauka, 1977. [In Russian]
12. Shipilov V. V. *Kontrol', diagnostika* [Control, diagnostics]. 2006, no. 6, pp. 26–28. [In Russian]

Северцев Николай Алексеевич

доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник,
Федеральный исследовательский центр
«Информатика и Управление»
Российской академии наук
(Вычислительный центр
им. А. А. Дородницына РАН)
(119333, Россия, г. Москва, ул. Вавилова, 40)
E-mail: severs@ccas.ru

Severtsev Nikolay Alekseevich

doctor of technical sciences, professor,
chief researcher,
Federal research center
«Computer science and control» of RAS
(Dorodnitsyn computer center
of the Russian Academy of Sciences)
(119333, 40 Vavilova street, Moscow, Russia)

Бецков Александр Викторович

доктор технических наук, доцент,
заместитель начальника,
Академия управления МВД России
(125171, Россия, г. Москва,
ул. Зои и Александра Космодемьянских, 8)
E-mail: abckov@mail.ru

Дарьина Анна Николаевна

кандидат физико-математических наук, доцент,
ведущий научный сотрудник,
Федеральный исследовательский центр
«Информатика и Управление»
Российской академии наук
(Вычислительный центр
им. А. А. Дородницына РАН)
(119333, Россия, г. Москва, ул. Вавилова, 40)
E-mail: daryina@ccas.ru

Betskov Aleksandr Viktorovich

doctor of technical sciences,
associate professor, deputy chief,
Management Academy of the Ministry of the Interior
of the Russian Federation
(125171, 8 Zoi i Aleksandra Kosmodem'yanskikh
street, Moscow, Russia)

Darina Anna Nikolaevna

candidate of physical and mathematical sciences,
associate professor, leading researcher,
Federal research center
«Computer science and control» of RAS
(Dorodnitsyn computer center
of the Russian Academy of Sciences)
(119333, 40 Vavilova street, Moscow, Russia)

Образец цитирования:

Северцев, Н. А. Методы и модели создания автоматизированных средств контроля для повышения безопасности функционирования технических систем / Н. А. Северцев, А. В. Бецков, А. Н. Дарьина // Надежность и качество сложных систем. – 2019. – № 2 (26). – С. 19–26. – DOI 10.21685/2307-4205-2019-2-3.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ

TECHNOLOGICAL BASES OF IMPROVING THE RELIABILITY AND QUALITY OF PRODUCTS

УДК 519: 24; 53; 57.017

DOI 10.21685/2307-4205-2019-2-4

A. I. Ivanov, S. E. Vjatchanin, E. A. Malygina, V. S. Lukin

PRECISION STATISTICS: NEUROET NETWORKING OF CHI-SQUARE TEST AND SHAPIRO–WILK TEST IN THE ANALYSIS OF SMALL SELECTIONS OF BIOMETRIC DATA

А. И. Иванов, С. Е. Вятчанин, Е. А. Малыгина, В. С. Лукин

ПРЕЦИЗИОННАЯ СТАТИСТИКА: НЕЙРОСЕТЕВОЕ ОБОБЩЕНИЕ ХИ-КВАДРАТ КРИТЕРИЯ И КРИТЕРИЯ ШАПИРО – УИЛКА ПРИ АНАЛИЗЕ МАЛЫХ ВЫБОРОК БИОМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Abstract. The aim of the paper is a neural network generalization of the Chi-square test and the Shapiro–Wilk test for the analysis of small samples of biometric data. It is shown that any of the statistical criteria can be represented in the form corresponding to a neuron having an input sorter, an adder and some functional converter. The generalization of two statistical criteria is accomplished by tuning the output quantizers of two neurons. The setting is always ambiguous for a predetermined value of the confidence probabilities of the generalized decisions. It is shown that the usual form of presentation of statistical criteria in the form of computational formulas and the tables of quantiles of confidence probability of the equivalent to their neural network description if the tables of the ratio of quantization thresholds providing a given level of confidence in a neural network generalization are given.

Keywords: the Chi-square test; the Shapiro–Wilk test; the neural network generalization of statistical criteria.

Аннотация. Целью работы является нейросетевое обобщение хи-квадрат критерия и критерия Шапиро – Уилка для анализа малых выборок биометрических данных. Показано, что любой из статистических критериев может быть представлен в форме соответствующего нейрона, имеющего сортировщик входных данных, сумматор и некоторый функциональный преобразователь. Обобщение двух статистических критериев осуществляется настройкой выходных квантователей двух нейронов. Настройка всегда неоднозначна для заранее заданного значения доверительных вероятностей принимаемых обобщенных решений. Показано, что обычная форма представления статистических критериев в виде вычислительных формул и таблиц квантилей доверительной вероятности эквивалентна их нейросетевому описанию, если приведена таблица соотношения порогов квантования, обеспечивающих заданный уровень доверительной вероятности нейросетевого обобщения.

Ключевые слова: хи-квадрат критерий; критерий Шапиро – Уилка; нейросетевое обобщение статистических критериев.

The problem of providing high reliability of neural network converters of biometrics-code during their training on small samples

Currently, the digital economy is being actively created. One of the most important elements of new technologies is the biometric-cryptographic authorization of users when providing them with "cloud" services. In Russia, this technology is built using large artificial neural networks which are automatically trained how to convert a unique biometric image of a person into his personal cryptographic key [1]. The domestic market of information security in terms of the use of artificial neural networks is regulated by FSTEC (Federal Service of Technical and Export Control) of Russia according to the legal documents of the Technical Committee for Standardization "Information Security" № 362. In terms of the cryptographic protection of neural network solutions, the domestic market is regulated by the FSS (Federal Security Service) of Russia, based on the documents of the technical Committee for Standardization № 026 "Cryptographic protection of information" [2].

The current requirements of domestic regulators for neural network converters biometry-code are currently much tougher than similar requirements of NIST USA and international Committees of standardization ISO / IEC JTC1 sc27 (Information Protection Technology) and ISO / IEC JTC1 sc37 (Biometry). The latter is due to the fact that the requirements of international standards are focused on international biometric passports, whose "biometric templates" are not designed to store them in the Internet clouds. This leads to the fact that the user is always forced to carry an RFID-identifier and always work in a trusted computing environment.

Domestic neural network technologies are potentially deprived of this disadvantage, if neural network containers with biometric data are protected cryptographically [2]. In this case, it becomes possible to have electronic biometric passports safely stored in the Internet by the Federal Migration Service of Russia. Unfortunately, new technologies are poorly suited to well-tested traditional statistical methods of data processing [3, 4]. Thus, for the correct application of the Chi-square test, the standard recommendations [3] assume a sample of 200 experiments, while the real training samples contain about 20 examples. A similar situation arises when applying the Shapiro-Wilk test [4]. In order to overcome such significant limitations, it is necessary to radically change the algorithms of statistical data processing. For example, the testing of the quality of training of artificial neural networks must be performed in the Hamming convolution space [5, 6]. The transition from the space of ordinary codes with 256 possible states to the Hamming convolution space allows us to logarithmically reduce the number of states to 257.

The situation is approximately the same when we use 256 variations, long-known statistical criteria, in place of one test of statistical hypotheses. The task of this article is to describe the neural network generalization of the classical Chi-square test and the Shapiro-Wilk test. Using the generalization of these two classical criteria, we will try to estimate the resulting gain from their joint use.

Application of the Chi-square test for small biometric data samples

For estimates on the Chi-square test, it is necessary to find the maximum and minimum values of the data in the sample. Next, you need to set the number of intervals -k of the histogram and find the width of these intervals:

$$\Delta x = \frac{\max(x) - \min(x)}{k}. \quad (1)$$

Then you should count the number of examples in the analyzed sample, which fell into each of the intervals -k of the histograms. With this histogram forming, the minimum sample value is the left border of the first column of the histogram, and the maximum value of the sample coincides with the right border of the rightmost column of the histogram.

The Chi-square value of the criterion is calculated using the following formula:

$$\chi^2 = N \cdot \sum_{i=1}^k \frac{\left(\frac{n_i}{N} - P_i \right)^2}{P_i}, \quad (2)$$

where n_i – the number of experiments in the i-th column of the histogram, P_i – the expected probability of testing in the i-th column of the histogram.

The popularity of the Pearson's Chi-square test is due to the fact that an analytical description of the density distribution of values is known for it:

$$p(\chi^2, m) = \frac{1}{2^{\frac{m}{2}} \cdot G\left(\frac{m}{2}\right)} \left\{ x^{\frac{m}{2}-1} \cdot \exp\left(\frac{-x}{2}\right) \right\}, \quad (3)$$

where m – the number of degrees of freedom, $G(\cdot)$ – the Euler gamma function.

It is recommended [3] to choose the number of degrees of freedom by the formula:

$$m = k - 3 = k - 2 - 1, \quad (4)$$

when the problem of checking the normality of empirical statistics is solved. The formula (4) is usually justified by the fact that the normal distribution law is described by two statistical moments (mathematical expectation and standard deviation). In order to use the formula (2), we need to calculate two statistical moments, which should lead to a decrease in the number of degrees of freedom by two units. The greater the number of statistical moments described by the theoretical distribution law, the lower should be index of the number of degrees of freedom – m . If the theoretical law is described by d statistical moments, then the number of degrees of freedom should be [3]:

$$m = k - d - 1. \quad (5)$$

It should be noted that the above approach for large samples works well, but for small samples, the calculation of only integer degrees of freedom (5) does not work well. This is easily seen in 100,000 sample implementations consisting of 21 experiences of normal data distribution. In this numerical experiment, we observe the distribution of the Chi-square values of the criterion, shown in Fig. 1.

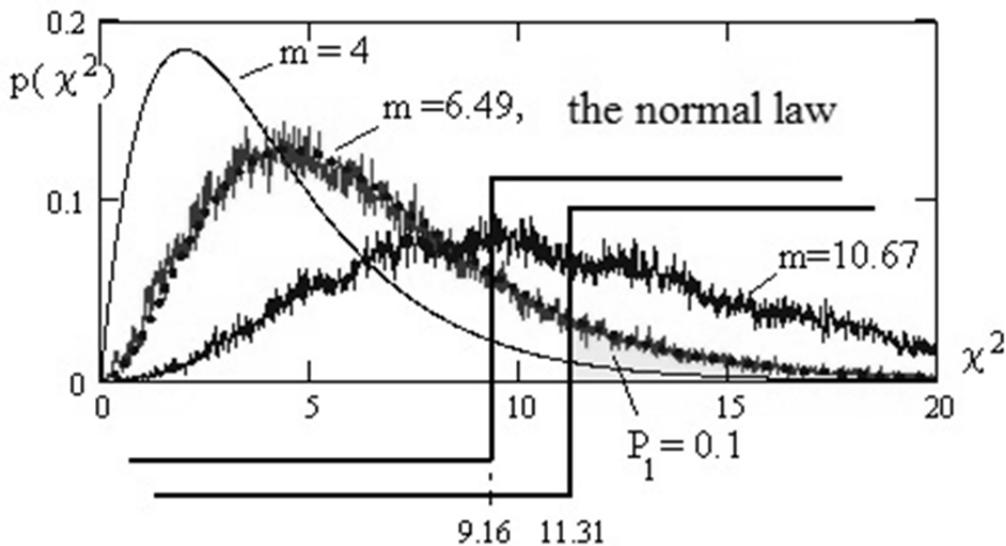


Fig. 1. Fractional number of degrees of freedom $m = 6.49$ for values of Chi-square values of sample distribution of 21 examples with normal data distribution and a histogram of 7 columns

Figure 1 shows that the recommended value in (5) of the member of degrees of freedom $m = 4$ is significantly different from the real value $m = 6.49$. As a result, the decision threshold with a confidence level of 0.9 should be $\chi^2 \geq 11.31$. For the confidence probability of 0.8, the decision threshold is reduced to $\chi^2 \geq 9.16$.

It should be emphasized that setting of thresholds according to formula (5) will lead to the effect of approximately twofold lowering of the probability of errors of the first kind – P_1 of the decisions made on small samples, which is unacceptable in the analysis of biometric data.

Application of the Shapiro-Wilk test for small samples of biometric data

By analogy with the use of the Chi-square test in the verification of statistical hypotheses, we have the right to use the Shapiro–Wilk test [4] for sampling in 21 examples:

$$\omega_{21}^2 = \frac{1}{\sigma^2(x)} \left[\sum_{i=0}^9 a_i \cdot (x_{20-i} - x_i) \right]^2, \tag{6}$$

when a_i – the weight coefficients of the criterion, which are given in Table 1 for a given sample of 21 examples.

Table 1

i	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
a_i	0.4634	0.3185	0.2578	0.2119	0.1736	0.1399	0.1039	0.0804	0.053	0.0263

The distribution of the values of the Shapiro–Wilk test for the normal law and the uniform distribution law are shown in Fig. 2.

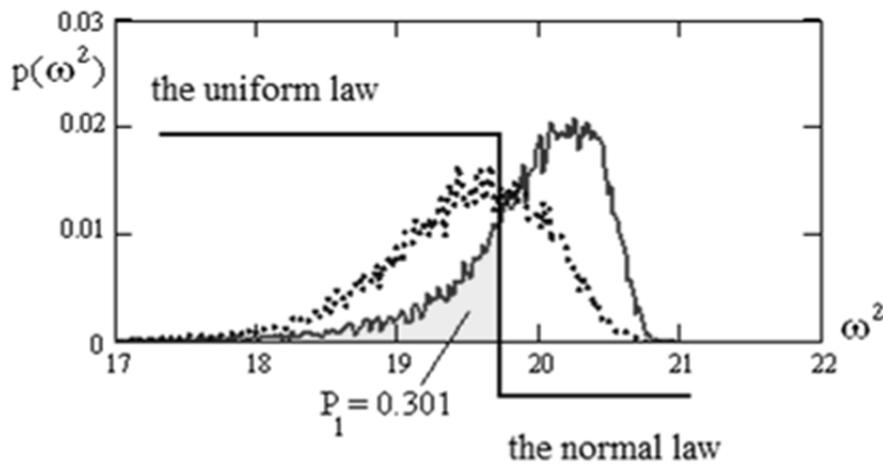


Fig. 2. Distributions of values of the Shapiro–Wilk test for the normal and uniform distributions of values

It can be seen from Fig. 2 that the distribution of the normal law is located in its right-hand side. The distribution of the values of the states of the criterion on the left-hand side of the figure corresponds to the substitution in the formula (6) of data with a uniform law. We divide these distribution laws by a quantizer with a threshold $\omega^2 = 19.8$ and a state "0" for normal data. State "1" will be most likely for uniform data. In this case, the probability of erroneous acceptance of the uniform law data for the normal law is $P_1 = 0.301$.

Representation of the chi-square criterion as an artificial neuron

It should be noted that the neural network emulator of quadratic forms is known in biometrics for a long time [7] and it is a special case of radially basic neurons with the transformation of data of the following form:

$$\left\{ \begin{array}{l} y = \sum_{i=1}^n \left(\frac{(v_i - E(v))}{\sigma(v)} \right)^2, \\ z(y) = "0" \text{ if } y \leq k, \\ z(y) = "1" \text{ if } y > k, \end{array} \right. \tag{7}$$

where k – the value of the threshold of the output quantizer of the neuron, v_i – the value of the i -th biometric parameter in the sample, $E(v)$ – the mathematical expectation of the biometric parameter, $\sigma(v)$ – the standard deviation of the biometric parameter, n – the number of inputs in the neuron or the size of the training sample.

However, the power of the neural network transformation (7) is much inferior to the classical chi-square criterion. Align the power, if in addition to the transformation (7), sort the input data of the neuron [8]:

$$\begin{cases} \tilde{v} = \text{sort}(v), \\ \tilde{y} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{(\tilde{v}_i - E(\tilde{v}))}{\sigma(\tilde{v})} \right)^2, \\ z(\tilde{y}) = "0" \text{ if } \tilde{y} \leq k, \\ z(\tilde{y}) = "1" \text{ if } \tilde{y} > k. \end{cases} \quad (8)$$

All classical statistical criteria include a sorting operation, while the conventional neurons of this data processing do not use. Combining the sorting operation with conventional neural network transformation operations is technically easy to implement, however, the addition of this operation with other operations of artificial neurons gives them new opportunities.

In the end, we get a quadratic neuron that reproduces Pearson's statistics well. In this case, the Chi-square neuron will be described by a criterion similar to the classical Chi-square table of quantiles of confidence probabilities. Below it is a complete table describing the Chi-square of the neuron for the four values of the quantization thresholds.

Table 2

Name of conversion, sample size	Output comparator threshold	P_1 Normal law	P_2 Uniform law	$\frac{P_1 + P_2}{2}$
Chi-square neuron to sample of 21 examples	$k = 9.16$	0.20	0.382	0.291
	$k = 10.16$	0.14	0.457	0.298
	$k = 11.31$	0.10	0.544	0.322
	$k = 12.31$	0.08	0.612	0.341

From Table 2 it is seen that an increase in the threshold of Chi-square neuron leads to a decrease in the errors of the first kind – P_1 (an erroneous refusal to recognize the presented distribution as normal). At the same time, the probability of errors of the second kind – P_2 (an erroneous recognition of the uniform distribution as normal) increases. Obviously, errors of the first and second kind can be reduced by increasing the size of the test sample. However, this path is difficult to implement in practice. A medical student or biologist who already has a sample of 21 examples, often can not increase it. In order to make a sample of 22 examples, a physician needs another patient with the necessary diagnosis. A biologist needs to get another copy of a rare plant or animal.

Representation of the Shapiro-Wilk test as an artificial neuron

By analogy with the Chi-square neuron, we can create the Shapiro-Wilk neuron:

$$\begin{cases} \tilde{v} = \text{sort}(v), \\ \tilde{y} = \frac{1}{(\sigma(\tilde{v}))^2} \left[\sum_{i=0}^9 a_i \cdot (\tilde{v}_{20-i} - \tilde{v}_i) \right]^2, \\ z(\tilde{y}) = "0" \text{ if } \tilde{y} \geq k, \\ z(\tilde{y}) = "1" \text{ if } \tilde{y} < k. \end{cases}$$

At different values of the quantization threshold, this artificial neuron will have different error ratios of the first and second kind (Table 3).

Table 3

Name of conversion, sample size	Output comparator threshold	P_1 Normal law	P_2 Uniform law	$\frac{P_1 + P_2}{2}$
Shapiro–Wilk neuron to sample of in 21 examples	$k = 19.8$	0.31	0.30	0.305
	$k = 19.6$	0.19	0.44	0.315
	$k = 19.4$	0.12	0.57	0.345
	$k = 19.2$	0.08	0.71	0.395

Description of the network of two neurons, summarizing two classical cooperating statistical criteria

Domestic neural network biometry is based on the fact that one neuron is responsible for one bit of the output code [9–11]. Let's keep this rule, integrating the Chi-square neuron and the Shapiro–Wilk neuron into the network. In this situation, the output code corresponding to the state "00" will mean the confirmation of the hypothesis of normality of the analyzed data. The state of the output code "11" will be considered as a rejection of the hypothesis of normality by both criteria. The states "01" and "10" will be considered as indeterminate (they contradict each other). In order to reveal this uncertainty it is necessary to complicate the decisive rule, which is beyond the scope of this article.

Table 4

Name of conversion, sample size	Output comparators thresholds	P_1 Normal law	P_2 Uniform law	$\frac{P_1 + P_2}{2}$
The first Chi-square neuron to sample in 21 examples	$k_1 = 9.16$ $k_2 = 19.0$	0.043	0.205	0.124
	$k = 9.16$ $k_2 = 19.2$	0.061	0.291	0.176
The second Shapiro–Wilk neuron To sample in 21 examples	$k_1 = 9.16$ $k_2 = 19.4$	0.081	0.395	0.238
	$k_1 = 9.16$ $k_2 = 19.6$	0.112	0.491	0.301
	$k_1 = 9.16$ $k_2 = 19.8$	0.145	0.556	0.351

If we compare the data of Table 1–3, we can observe a significant decrease in the probabilities of errors of the first and second kind for neural network generalization of two statistical criteria. Since the probabilities of errors of the first and second kind vary in different directions, when comparing data it is convenient to use their averaging (the last column of the compared tables).

In turn, comparing Table 1 and Table 2, we can make an unambiguous conclusion that the Chi-square neuron is more powerful than the Shapiro–Wilk neuron. According to the average error probabilities of the first and second kind, the Chi-square neuron gives a value of 0.291, while for the Shapiro–Wilk neuron this value is 0.305.

If we combine neurons according to the rule, the average value of the error probabilities can be reduced to 0.124 (more than twice).

Conclusion

Obviously, by analogy with the proposed neural network generalization of two statistical criteria, it is possible to construct a similar generalization for a larger number of statistical criteria. The addition of each new statistical criterion always improves the quality of the statistical decisions made by the neural network. The main condition for generalized criteria is that their values should not be strongly correlated. In particular, the positive result of the generalization described in this article is due to the fact that the data of the statistical criteria under consideration are not completely correlated $corr(\chi^2, \omega^2) = -0.726$ for a sample of 21 examples. The higher the modulus of the correlation coefficient of the combined statistical criteria, the worse the final result is obtained.

It is also obvious that any of the known statistical criteria can be represented as a certain neuron with a certain quantization threshold. In Table 4, each row connects the different quantization thresholds of two different neurons. If the number of generalized statistical criteria increases, then the number of related quantization thresholds should increase proportionally. Finding the optimal ratio of thresholds for neurons of different statistical criteria is an independent task.

References

1. GOST R 52633.5-2011 Information protection. Information protection technology. Automatic learning of neural network converters biometry-access code.
2. Technical specification (project, public discussion started on 01.02.2017 by members of TK 26 "Cryptographic protection of information") PROTECTION OF NEUROET-NET BIOMETRIC CONTAINERS WITH THE USE OF CRYPTOGRAPHIC ALGORITHMS.
3. P 50.1.037-2002 Recommendations of standardization. Applied statistics. Rules for verifying the agreement between the experimental distribution and the theoretical distribution. Part I. Criteria of the type χ^2 . State standard of Russia. – Moscow, 2001. – 140 p.
4. Kobzar, A. I. Applied mathematical statistics. For engineers and scientists / A. I. Kobzar. – Moscow : FIZMATLIT, 2006. – 816 p.
5. GOST R 52633.3-2011 Information protection. Information protection technology. Testing the robustness of highly reliable biometric protection to assault attacks.
6. Akhmetov, B. S. Algorithms for testing of biometric-neural network mechanisms of information protection / B. S. Akhmetov, V. I. Volchikhin, A. I. Ivanov, A.Y. Malygin. – Kazakhstan, Almaty, KazNTU Satpayev, 2013. – 152 p. – URL: <http://portal.kazntu.kz/files/publicate/2014-01-04-11940.pdf>
7. Akhmetov, B. B. Multidimensional statistics of essentially dependent biometric data, which are generated by neural network emulators of quadratic forms : monograph / B. B. Akhmetov, A. I. Ivanov. – Kazakhstan, Almaty : From LEM, 2016. – 86 p.
8. Volchikhin, V. I. Absolutely stable algorithm of automatic learning of networks of probabilistic neurons "Kramervon Mises" on small samples of biometric data / V. I. Volchikhin, A. I. Ivanov, S. E. Vjatchanin, E. A. Malygina // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. The Volga region. Technical science. – 2017. – № 2 (42). – P. 55–65.
9. Justification and selection of statistical criteria for correct evaluation of small samples data of biometric images / A. I. Ivanov, E. A. Malygina, Yu. I. Serikova, S. E. Vjatchanin, E. N. Kupriyanov // Proceedings of the International Symposium Reliability and quality. – 2018. – Vol. 1. – P. 176–178.
10. Neural networks improve the quality of decisions by switching from a double quantization functions to functions of quantization with multiple levels / E. A. Malygina, A. I. Solopov, Yu. I. Serikova, A. I. Gazin, E. N. Kupriyanov // Proceedings of the International Symposium Reliability and quality. – 2018. – Vol. 1. – P. 182–183.
11. Features testing neural network converters biometrics code on small test samples of alien images / V. I. Volchikhin, A. Yu. Malygin, I. V. Urnev, A. V. Serikov, E. N. Kupriyanov // Proceedings of the International Symposium Reliability and quality. – 2018. – Vol. 1. – P. 52–53.

References

1. GOST R 52633.5-2011 "Information protection. Information protection technology. Automatic learning of neural network converters biometry-access code."
2. Technical specification (project, public discussion started on 01.02.2017 by members of TK 26 "Cryptographic protection of information") PROTECTION OF NEUROET-NET BIOMETRIC CONTAINERS WITH THE USE OF CRYPTOGRAPHIC ALGORITHMS
3. R 50.1.037-2002 Recommendations of standardization. Applied statistics. Rules for verifying the agreement between the experimental distribution and the theoretical distribution. Part I. Criteria of the type χ^2 . State standard of Russia. Moscow, 2001, 140 p.
4. Kobzar A. I. Applied mathematical statistics. For engineers and scientists. Moscow: FIZMATLIT, 2006, 816 p.
5. GOST R 52633.3-2011 "Information protection. Information protection technology. Testing the robustness of highly reliable biometric protection to assault attacks."
6. Akhmetov B. S., Volchikhin V. I., Ivanov A. I., Malygin A. Y. Algorithms for testing of biometric-neural network mechanisms of information protection. Kazakhstan, Almaty, KazNTU Satpayev, 2013, 152 p. Available at: <http://portal.kazntu.kz/files/publicate/2014-01-04-11940.pdf>
7. Akhmetov B. B., Ivanov A. I. Multidimensional statistics of essentially dependent biometric data, which are generated by neural network emulators of quadratic forms: monograph. Kazakhstan, Almaty. From LEM, 2016, 86 p.

8. Volchikhin V. I., Ivanov A. I., Vjatchanin S. E., Malygina E. A. University proceedings. Volga region. Engineering sciences. 2017, no. 2 (42), pp. 55–65.
9. Ivanov A. I., Malygina E. A., Serikova Yu. I., Vjatchanin S. E., Kupriyanov E. N. *Proceedings of the International Symposium Reliability and quality*. 2018, vol. 1, pp. 176–178.
10. Malygina E. A., Solopov A. I., Serikova Yu. I., Gazin A. I., Kupriyanov E. N. *Proceedings of the International Symposium Reliability and quality*. 2018, vol. 1, pp. 182–183.
11. Volchihin V. I., Malygin A. Yu., Urnev I. V., Serikov A. V., Kupriyanov E. N. *Proceedings of the International Symposium Reliability and quality*. 2018, vol. 1, pp. 52–53.

Иванов Александр Иванович

доктор технических наук, доцент,
ведущий научный сотрудник,
Пензенский научно-исследовательский
электротехнический институт
(440000, Россия, Пенза, Советская площадь, 9)
E-mail: bio.ivan.penza@mail.ru

Вятчанин Сергей Евгеньевич

доцент, начальник кафедры радио- и
космической связи,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: ivo@pnzgu.ru

Мальгина Елена Александровна

кандидат технических наук, научный сотрудник,
межотраслевая лаборатория тестирования
биометрических устройств и технологий,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: e-mail: ivo@pnzgu.ru

Лукин Виталий Сергеевич

аспирант,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: ivo@pnzgu.ru

Ivanov Alexander Ivanovich

doctor of technical sciences, associate professor,
senior researcher,
Penza Scientific and Research
Electrotechnical Institute
(440000, 9 Soviet square, Penza, Russia)

Vjatchanin Sergej Evgenevich

associate professor,
head of sub-department
of radio-space communications,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Malygina Elena Aleksandrovna

candidate of technical sciences, researcher,
interdisciplinary laboratory testing
of biometric devices and technologies,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Lukin Vitaliy Sergeevich

postgraduate student,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Ivanov, A. I. Precision statistics: neuroet networking of chi-square test and shapiro-wilk test in the analysis of small selections of biometric data / A. I. Ivanov, S. E. Vjatchanin, E. A. Malygina, V. S. Lukin // Надежность и качество сложных систем. – 2019. – № 2 (26). – С. 27–34. – DOI 10.21685/2307-4205-2019-2-4.

В. С. Михайлов

НЕЯВНЫЕ ОЦЕНКИ ДЛЯ ПЛАНА С ОГРАНИЧЕННЫМ ВРЕМЕНЕМ ИСПЫТАНИЙ И ВОССТАНОВЛЕНИЕМ ИЗДЕЛИЙ В СЛУЧАЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ОТКАЗА

V. S. Mikhaylov

IMPLICIT ESTIMATES FOR A PLAN WITH LIMITED TEST TIME AND PRODUCT RECOVERY IN THE EVENT OF A FAILURE

Аннотация. Целью настоящей работы является построение оценки, заданной в неявном виде и близкой по своим свойствам к эффективной оценке, основанной на интегральном подходе, для испытаний, проводимых в соответствии с планом типа $NB\tau$. **Методы.** Для нахождения эффективной оценки использовались интегральные числовые характеристики точности оценки, а именно: суммарный квадрат смещения (уклонения) ожидаемой реализации некоторого варианта оценки от всех возможных значений оцениваемой характеристики по различным значениям параметра пуассоновского з.р., характеризующего поток отказов совокупности испытуемых изделий. **Результаты и выводы.** 1. Интегральный подход показал свою эффективность при выявлении свойств неявно заданных оценок. 2. Неявно заданная оценка СНДО \bar{T} (формула (6)) является эффективной среди предложенных смещенных оценок. Для безотказных испытаний оценку \bar{T} можно применять как для плана типа $NB\tau$, так и для плана типа $НБ\tau$. 3. В качестве оценки ВБР всегда следует использовать традиционную несмещенную оценку (формула (11)), кроме безотказных испытаний. В этом случае следует использовать смещенную, эффективную и неявно заданную оценку ВБР $\bar{P} = \exp\left(-\frac{g}{T}\right)$ (формула (9)). Для безот-

казных испытаний оценку \bar{P} можно применять как для плана типа $NB\tau$, так и для плана типа $НБ\tau$.

Ключевые слова: пуассоновский закон распределения; экспоненциальное распределение; план испытаний; точечная оценка.

Abstract. Background. The purpose of this paper is to construct an estimate that is implicitly defined and close in its properties to an effective estimate based on an integral approach for tests conducted in accordance with a plan of type $NB\tau$. **Methods.** To find an effective estimate, we used the integral numerical characteristics of the accuracy of the estimate, namely, the total square of the displacement (deviation) of the expected realization of a certain valuation variant from all possible values of the estimated characteristic from the different values of the parameter of the Poisson crt characterizing the failure flow of the set of products under test. **Results and conclusions.** 1. The integral approach has shown its effectiveness in identifying the properties of implicitly given estimates. 2. An implicitly given estimate of the mean time to failure \bar{T} (formula (6)) is effective among the proposed biased estimates (Table 1). For fault-free testing, the \bar{T} estimate can be applied to both the $NB\tau$ type plan and the $НБ\tau$ type plan. 3. As an estimate of the probability of failure-free operation, a traditional unbiased estimate (formula (11)) should always be used, except for fail-safe tests. In this case, a biased, effective and implicitly defined probability of failure-free operation $\bar{P} = \exp\left(-\frac{g}{T}\right)$

(formula (9)) should be used. For fault-free testing, the evaluation of \bar{P} can be applied to both the $NB\tau$ type plan and the $НБ\tau$ -type plan.

Keywords: Poisson distribution law; exponential distribution; test plan; point estimation.

Будем рассматривать пуассоновский поток отказов [1], который возникает при проведении испытаний по плану типа $NB\tau$, где N – число испытуемых однотипных изделий; τ – наработка (одинаковая для каждого изделия); B – характеристика плана, означающая, что работоспособность изделия после каждого отказа в течение срока испытаний восстанавливается [1]. При этом будем считать, что наработка до отказа изделий подчиняется экспоненциальному закону распределения вероятностей (далее – з.р.) с параметром T_0 , где последний совпадает со средней наработкой до от-

каза (далее – СНДО). Тогда расчетное значение вероятности безотказной работы (далее – ВБР) одного изделия за заданное время τ будет определяться равенством

$$P_0(\tau) = e^{-\left(\frac{\tau}{T_0}\right)} \tag{2}$$

Для плана типа $NB\tau$ достаточной статистикой является число наблюдаемых отказов (r) [1, 2]. Обозначим случайное число отказов через R , тогда для плана испытаний типа $NB\tau$ случайная величина R (далее – с.в.) имеет пуассоновское распределение $L(r; \Delta)$ с параметром $\Delta = N\tau / T_0$ [1, 2]. Тогда по определению r – реализация с.в. R . С другой стороны, R – сумма с.в. X_i , каждая из которых есть случайное число отказов одного из N изделий ($1 < i < N$), поставленных на испытания. X_i имеют пуассоновское распределение с параметром Δ / N :

$$L(r; \Delta) = \sum_{k=0}^{X_1+\dots+X_N=r} e^{-\Delta} \frac{\Delta^k}{k!} \tag{2}$$

Целью настоящей работы является построение оценки, заданной в неявном виде и близкой по своим свойствам к эффективной оценке, основанной на интегральном подходе [3–5], для испытаний, проводимых в соответствии с планом типа $NB\tau$.

Заметим, что для функции от параметра $\varphi(\Delta) = 1/\Delta$ не существует несмещенной оценки по результатам испытаний одного изделия [6]. А следовательно, для плана типа $NB\tau$ ($N = 1$) невозможно получить несмещенную точечную оценку СНДО, поэтому смещенные точечные оценки – необходимый инструмент при оценивании СНДО.

Будем строить оценку, заданную в неявном виде, используя приемы построения доверительных интервалов. Функция $L(r; \Delta)$ убывает по Δ , и, следовательно, для построения одностороннего доверительного интервала $P(T_{0н} \left(\frac{1}{\Delta_b}\right) < T_0)$ или $P(T_{0в} \left(\frac{1}{\Delta_n}\right) > T_0)$ можно воспользоваться рекомендациями [2, ф. 2.14.14], а именно:

$$L(r; \Delta_n) = 1 - \alpha = \gamma \text{ или } L(r; \Delta_b) = \alpha = 1 - \gamma, \tag{3}$$

где γ – доверительная вероятность, α – уровень доверия. Решение уравнений (формула (3)) позволяет найти доверительные границы (Δ_b и Δ_n). Доверительное оценивание является дополнительным инструментом, который позволяет оценивать вероятность уклонения точечной оценки параметра надежности от его истинного значения [1]. Вероятность уклонения точечной оценки параметра надежности от его истинного значения вместе с доверительными границами служит уровнем доверия к результатам испытаний.

Если полученный интервал (Δ_b и Δ_n) свести в точку, то доверительные границы этого интервала совпадут, т.е. Δ_b станет равной Δ_n . Что определит точечную оценку $\hat{\Delta} = \Delta_b = \Delta_n$. Такой результат возможен в единственном случае, когда $\gamma = \alpha = 1 - \gamma = 0,5$, что определяет единственность оценки $\hat{\Delta}$.

Воспользуемся формулой (2) и изучим свойства оценки $\hat{\Delta}$, получаемой из уравнения

$$L(r; \Delta) = \sum_{k=0}^r e^{-\Delta} \frac{\Delta^k}{k!} = 0,5 \text{ или } \varepsilon(\Delta) = \ln(2) + \ln\left(\sum_{k=0}^r \frac{\Delta^k}{k!}\right) - \Delta. \tag{4}$$

Минимизируя абсолютную величину $\varepsilon(\Delta)$ с необходимой точностью, получим искомую точечную оценку параметра Пуассона $\hat{\Delta} = \hat{\Delta}(R)$. Имея оценку $\hat{\Delta}$, легко получить оценку СНДО

$$\hat{T} = \frac{N\tau}{\hat{\Delta}} = \frac{v}{\hat{\Delta}} \text{ или оценку ВБР } \hat{P}(\tau) = e^{-\left(\frac{\tau}{\hat{T}}\right)} = e^{-\left(\frac{\hat{\Delta}}{N}\right)}.$$

Оценка СНДО $\hat{T} = \frac{N\tau}{\hat{\Delta}(R)} = \nu\varphi(R)$, т.е. оценка \hat{T} принадлежит классу смещенных оценок $\hat{\theta}(R, \nu)$ представимых в виде $\hat{\theta}(R, \nu) = \nu\varphi(R)$. В основе сравнения этих оценок лежит функционал (далее – $A(\hat{\theta})$) [3]:

$$A(\hat{\theta}) = \int_0^{\infty} \left(\frac{1}{\theta(T_0)} \right)^2 \{E\hat{\theta}(R, N, \tau) - \theta(T_0)\}^2 \partial\Delta. \quad (5)$$

В табл. 1 приведены результаты подстановки в функционал $A(\hat{\theta}(R, \nu))$ в соответствии с формулой (5) следующих оценок СНДО:

– неявно заданная оценка $\hat{T} = \frac{\nu}{\hat{\Delta}(R)}$;

– интегральная эффективная оценка на классе смещенных оценок $\hat{\theta}(R, \nu)$, представимых в виде $\hat{\theta}(R, \nu) = \frac{\nu}{R+1} + \nu f(R)$, а именно:

$$T_{01} = 2NT, \text{ при } r = 0 \text{ и } T_{01} = \frac{NT}{r+1}, \text{ при } r > 0;$$

и оценок вида

– $T_{02} = 2NT$, при $r = 0$ и $T_{02} = \frac{NT}{r}$, при $r > 0$;

– $T_{03} = \frac{NT}{r+1}$;

– $T_{04} = 6NT$, при $r = 0$ и $T_{04} = \frac{NT}{r+0,5}$, при $r > 0$.

Таблица 1

Результаты подстановки оценок СНДО в функционал $A(\hat{\theta}(R, \nu))$ в соответствии с формулой (5)

Функционал	\hat{T}	T_{01}	T_{02}	T_{03}	T_{04}
$A(\hat{\theta}(R, \nu))$	0,370	0,250	1,437	0,500	5,36

Из табл. 1 следует, что оценка T_{01} обладает минимальным суммарным смещением из числа предложенных оценок. Однако смещение оценки $\hat{T} = \frac{\nu}{\hat{\Delta}(R)}$ можно уменьшить, если представить ее в следующем измененном виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{T} = \frac{1,5\nu}{\hat{\Delta}(R)}, R = 0, \\ \bar{T} = \frac{\nu}{\hat{\Delta}(R) + 0,5}, R > 0. \end{array} \right. \quad (6)$$

Тогда $A(\bar{T}(R, \nu)) = 0,2344$, что меньше значения функционала для эффективной оценки $A(T_{01}(R, \nu)) = 0,25$ [4]. Такое возможно потому, что оценка \bar{T} задана неявным способом и принадлежит классу оценок $\bar{T} \in X$, которые представимы в виде $\hat{\theta}(R, \nu) = \nu\varphi(R)$ – класс оценок $\hat{\theta} \in Z$

(класс оценок $\bar{T} \in X \in Z$) и не представимы в виде $\hat{\Omega}(R, \nu) = \frac{\nu}{R+1} + \nu f(R)$ – класс оценок $\hat{\Omega} \in Y \in Z$ [4] ($\bar{T} \in X$) \notin ($\hat{\Omega} \in Y$), т.е. более широкий класс оценок Z включает в себя отличимые по этому признаку классы оценок Y и X ($X + Y \in Z$). Этим показано, что поиск эффективных оценок следует искать, в том числе, и на классе оценок заданных неявно вне класса Y .

Полученную оценку \bar{T} можно рекомендовать в качестве эффективной оценки наравне с оценкой T_{01} , которая является абсолютно эффективной на классе оценок представимых в виде $\hat{\Omega}(R, \nu) = \frac{\nu}{R+1} + \nu f(R)$ [4]. Однако, как показано в табл. 2, разброс значений оценки \bar{T} шире разброса значений оценок \hat{T} и T_{01} . Такое приобретенное нежелательное свойство оценки \bar{T} является следствием процесса подбора уменьшения смещения оценки \hat{T} . Поэтому оценка T_{01} как более простая в сравнении с \bar{T} продолжает играть свою роль эффективной оценки. Для безотказных испытаний оценки \bar{T} и T_{01} можно применять как для плана типа NB τ , так и для плана типа ЛБ τ (Б – без восстановления).

Рассмотрим функционал (далее – $B(\hat{\theta})$), основанный на суммировании математических ожиданий квадратов относительных уклонений оценок $\hat{\theta}(R, N, \tau)$ от $\theta(T_0)$ для всех возможных значений T_0, N и τ , а именно:

$$B(\hat{\theta}) = \int_0^{\infty} \left(\frac{1}{\theta(T_0)} \right)^2 E \{ \hat{\theta}(R, N, \tau) - \theta(T_0) \}^2 \Delta. \tag{7}$$

С помощью функционала $B(\hat{\theta})$ можно оценить разброс значений всех предложенных оценок (см. табл. 1 и 2). Результаты подстановки оценок СНДО в функционал $B(\hat{\theta}(R, \nu))$ в соответствии с формулой (7) приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты подстановки оценок СНДО в функционал $B(\hat{\theta}(R, \nu))$ в соответствии с формулой (7)

Функционал	\hat{T}	\bar{T}	T_{01}	T_{02}	T_{03}	T_{04}
$B(\hat{\theta}(R, \nu))$	6,47	9,50	8,63	12,84	4,64	65,69

Из табл. 2 следует, что минимальным разбросом обладает оценка T_{03} , а эффективная оценка \bar{T} уступает многим из предложенных оценок по этому показателю.

Рассмотрим оценки ВБР за временной отрезок g вида $\hat{\theta}(R, \nu, g) = e^{-g/\bar{T}}$, где \bar{T} – некоторая оценка СНДО (см. табл. 1 и 2).

В основе сравнения оценок ВБР по величине суммарного смещения лежит функционал (далее – $G(\hat{\theta}(R, \nu, g))$) [4] вида

$$G(\hat{\theta}) = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I \int_0^{\infty} \left\{ \sum_{k=0}^{\infty} \hat{\theta}(k, \nu_i, g_i) e^{-\Delta} \frac{\Delta^k}{k!} - e^{-\left(\frac{g_i \Delta}{\nu_i}\right)} \right\}^2 \Delta, \tag{8}$$

где δ – шаг суммирования, $I = \frac{\nu_2 - \nu_1}{\delta}$ и $J = \frac{g_2 - g_1}{\delta}$ – число шагов суммирования, $\nu \in [\nu_1; \nu_2]$ и $g \in [g_1; g_2]$ представляют из себя некоторый отрезок суммирования на числовой оси, ко-

торый выбирается исходя из задач надежности. Так как величина функционала $G(\hat{\theta}(R, \nu, g))$ с изменением границ интервалов для ν или g может стремиться как к нулю, так и к бесконечности, то следует ограничиваться рабочим диапазоном объема испытаний и времени ВБР, чтобы получить возможность сравнивать значения функционала для различных оценок. Реальный объем испытаний может колебаться в пределах от 1000 до 100 000 ч, а время ВБР – в пределах от 1000 до 100 000 ч, в зависимости от сложности и надежности испытываемого объекта. Результаты подстановки оценок ВБР в функционал $G(\hat{\theta}(R, \nu, g))$ в соответствии с формулой (8) приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты подстановки оценок ВБР в функционал $G(\hat{\theta}(R, \nu, g))$ в соответствии с формулой (8)

Функционал	$\exp\left(-\frac{g}{\hat{T}}\right)$	$\exp\left(-\frac{g}{T}\right)$	$\exp\left(-\frac{g}{T_{01}}\right)$	$\exp\left(-\frac{g}{T_{02}}\right)$	$\exp\left(-\frac{g}{T_{03}}\right)$	$\exp\left(-\frac{g}{T_{04}}\right)$
$G(\hat{\theta}(R, \nu, g))$	0,0410	0,0157	0,0346	0,0300	0,0641	0,0156

Из табл. 3 следует, что эффективной оценкой из числа предложенных является оценка $\exp\left(-\frac{g}{T_{04}}\right)$. Однако смещение неявно заданной оценки $\exp\left(-\frac{g}{\hat{T}}\right)$ можно уменьшить, если изменить числитель оценки \hat{T} и представить измененную оценку \hat{T} в следующем виде:

$$\begin{cases} \hat{T} = \frac{4 * \nu}{\hat{\Delta}(R)}, R = 0, \\ \hat{T} = \frac{\nu}{\hat{\Delta}(R)}, R > 0. \end{cases} \quad (9)$$

Тогда функционал примет значение $G\left(P = \exp\left(-\frac{g}{T}\right)\right) = 0,0157$, что меньше, чем у всех предложенных оценок в табл. 3, кроме оценки $\exp\left(-\frac{g}{T_{04}}\right)$, что позволяет также считать оценку $P = \exp\left(-\frac{g}{T}\right)$ эффективной в сравнении с предложенными и ее можно использовать в случае безотказных испытаний типов NB τ и NB τ .

Рассмотрим функционал, подобный функционалу $G(\hat{\theta})$ (далее – $S(\hat{\theta})$), но основанный на суммировании математических ожиданий квадратов относительных уклонений оценок $\hat{\theta}(R, \nu, g)$ от $P = \exp\left(-\frac{g}{T_0}\right)$ для всех возможных значений T_0 , ν и g , а именно:

$$S(\hat{\theta}) = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I \sum_{k=0}^{\infty} e^{-\Delta} \frac{\Delta^k}{k!} \left\{ \hat{\theta}(k, \nu_i, g_i) - e^{\left(-\frac{g_i \Delta}{\nu_i}\right)} \right\}^2 \partial \Delta. \quad (10)$$

С помощью функционала $S(\hat{\theta})$ можно оценить разброс значений всех предложенных оценок (см. табл. 3 и 4). Результаты подстановки оценок ВБР в функционал $S(\hat{\theta}(R, \nu, g))$ в соответствии с формулой (10) приведены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты подстановки оценок ВБР в функционал $S(\hat{\theta}(R, \nu, g))$ в соответствии с формулой (10)

Функционал	$\exp\left(-\frac{g}{\hat{T}}\right)$	$\exp\left(-\frac{g}{T}\right)$	$\exp\left(-\frac{g}{T_{01}}\right)$	$\exp\left(-\frac{g}{T_{02}}\right)$	$\exp\left(-\frac{g}{T_{03}}\right)$	$\exp\left(-\frac{g}{T_{04}}\right)$
$S(\hat{\theta}(R, \nu, g))$	0,0824	0,1187	0,0851	0,0856	0,0915	0,1202

Из табл. 4 следует, что смещенная и неявно заданная оценка $\exp\left(-\frac{g}{\hat{T}}\right)$ обладает минимальным разбросом. Однако эффективная оценка $\dot{P} = \exp\left(-\frac{g}{T}\right)$ лишь незначительно уступает ей в этом показателе. С другой стороны, оценка $\dot{P} = \exp\left(-\frac{g}{T_{04}}\right)$ как более простая в сравнении с $\dot{P} = \exp\left(-\frac{g}{T}\right)$ может также считаться эффективной оценкой.

При вычислениях функционалов $G(\hat{\theta}(R, \nu, g))$ и $S(\hat{\theta}(R, \nu, g))$ шаг суммирования по объему испытаний $\nu \in [1E + 3; 1E + 5]$ и величине времени ВБР $g \in [1E + 3; 1E + 5]$ производился по степеням с шагом равным единице, а именно: 1E + 03, 1E + 04, 1E + 05. Процесс вычисления функционалов $A(\hat{\theta}(R, \nu))$ и $B(\hat{\theta}(R, \nu))$ от объема испытаний ν не зависит.

Заметим, что при вычислениях варьирование шагом и диапазоном суммирования приводит к изменению результата функционала, но не меняет сути вещей – результат сравнения оценок не меняется.

В качестве оценки ВБР всегда следует использовать традиционную несмещенную оценку [1], а именно:

$$\hat{P}(g) = \left(1 - \frac{g}{N\tau}\right)^r, \text{ при } \frac{g}{N\tau} < 1; \hat{P}(g) = 0, \text{ при } \frac{g}{N\tau} \geq 1, \tag{11}$$

кроме безотказных испытаний. В этом случае следует использовать смещенную, эффективную и неявно заданную оценку ВБР $\dot{P} = \exp\left(-\frac{g}{T}\right)$. Для безотказных испытаний оценку \dot{P} можно применять как для плана типа NB τ , так и для плана типа NB τ .

Пример 1. По результатам безотказных испытаний объемом 1000 ч требуется сделать оценку СНДО.

В качестве эффективной оценки можно выбрать два варианта:

$$\bar{T}(r=0) = \frac{1,5\nu}{\hat{\Delta}(0)} = \frac{1,5 \cdot 1000}{0,6931} = 2164 \text{ ч};$$

$$T_{01}(r=0) = 2\nu = 2000 \text{ ч}.$$

Пример 2. По результатам безотказных испытаний объемом 1000 ч требуется сделать оценку ВБР за время 1000 ч.

В качестве эффективной оценки можно выбрать два варианта:

$$\dot{P}(r=0) = \exp\left(-\frac{g}{T}\right) = \exp\left(-g / \frac{4\nu}{\hat{\Delta}(0)}\right) = \exp\left(-\frac{1000 \cdot 0,6931}{4 \cdot 1000}\right) = 0,841,$$

$$\dot{P}(r=0) = \exp\left(-\frac{g}{T_{04}}\right) = \exp\left(-\frac{1000}{6 \cdot 1000}\right) = 0,846.$$

Заключение

1. Интегральный подход показал свою эффективность при выявлении свойств неявно заданных оценок.

2. Неявно заданная оценка СНДО \bar{T} (формула (6)) является эффективной среди предложенных смещенных оценок (см. табл. 1). Для безотказных испытаний оценку \bar{T} можно применять как для плана типа NB τ , так и для плана типа NB τ .

3. В качестве оценки ВБР всегда следует использовать традиционную несмещенную оценку (формула (11)), кроме безотказных испытаний. В этом случае следует использовать смещенную, эффективную (в классе смещенных оценок) и неявно заданную оценку ВБР $\dot{P} = \exp\left(-\frac{g}{T}\right)$ (формула (9)).

Для безотказных испытаний оценку \dot{P} можно применять как для плана типа NB τ , так и для плана типа NB τ .

Оценка $\dot{P} = \exp\left(-\frac{g}{T_{04}}\right)$ как более простая в сравнении с $\dot{P} = \exp\left(-\frac{g}{T}\right)$ может также считаться эффективной оценкой.

Библиографический список

1. Гнеденко, Б. В. Математические методы в теории надежности / Б. В. Гнеденко, Ю. К. Беляев, А. Д. Соловьев. – Москва : Наука, 1965. – 524 с.
2. Шуленин, В. П. Математическая статистика. Ч. 1. Параметрическая статистика / В. П. Шуленин. – Томск : Изд-во НТЛ, 2012. – 540 с.
3. Михайлов, В. С. Нахождение эффективной оценки средней наработки на отказ / В. С. Михайлов // Надежность и контроль качества. – 1988. – № 9. – С. 6–11.
4. Михайлов, В. С. Нахождение эффективной оценки средней наработки на отказ / В. С. Михайлов // Надежность. – 2016. – № 4. – С. 40–42.
5. Михайлов, В. С. Оценка вероятности безотказной работы по результатам испытаний, не давших отказы / В. С. Михайлов // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 2 (18). – С. 62–66.
6. Боровков, А. А. Математическая статистика / А. А. Боровков. – Новосибирск : Наука; Изд-во Института математики, 1997. – 772 с.

References

1. Gnedenko B. V., Belyaev Yu. K., Solov'ev A. D. *Matematicheskie metody v teorii nadezhnosti* [Mathematical methods in reliability theory]. Moscow: Nauka, 1965, 524 p. [In Russian]
2. Shulenin V. P. *Matematicheskaya statistika. Chast' 1. Parametricheskaya statistika* [Mathematical statistics. Part 1. Parametric statistics]. Tomsk: Izdatel'stvo NTL, 2012, 540 p. [In Russian]
3. Mikhailov V. S. *Nadezhnost' i kontrol' kachestva* [Reliability and quality control]. 1988, no. 9, pp. 6–11. [In Russian]
4. Mikhailov V. S. *Nadezhnost'* [Reliability]. 2016, no. 4, pp. 40–42. [In Russian]
5. Mikhailov V. S. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2017, no. 2 (18), pp. 62–66. [In Russian]
6. Borovkov A. A. *Matematicheskaya statistika* [Mathematical statistics]. Novosibirsk: Nauka; Izd-vo Instituta matematiki, 1997, 772 p. [In Russian]

Михайлов Виктор Сергеевич

ведущий инженер,
Центральный научно-исследовательский институт
химии и механики им. Д. И. Менделеева
(115487, Россия, г. Москва, ул. Нагатинская, 16а)
E-mail: Mvs1956@list.ru

Mikhailov Viktor Sergeevich

lead engineer,
Central Research Institute of Chemistry
and Mechanics named after D. I. Mendeleev
(115487, 16a Nagatinskaya street, Moscow, Russia)

Образец цитирования:

Михайлов, В. С. Неявные оценки для плана с ограниченным временем испытаний и восстановлением изделий в случае возникновения отказа / В. С. Михайлов // Надежность и качество сложных систем. – 2019. – № 2 (26). – С. 35–42. – DOI 10.21685/2307-4205-2019-2-5.

А. В. Маслобоев

МОДЕЛЬ И ТЕХНОЛОГИЯ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В УСЛОВИЯХ СЕТЕЦЕНТРИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ РЕГИОНАЛЬНОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ¹

A. V. Masloboev

DECISION-MAKING SUPPORT MODEL AND TECHNOLOGY FOR REGIONAL SECURITY NETWORK-CENTRIC CONTROL

Аннотация. *Актуальность и цели.* Целью исследования является повышение эффективности системы управления безопасностью региональных социально-экономических систем в условиях неопределенности и децентрализованного принятия решений. *Материалы и методы.* В качестве объекта исследований рассматривается многоуровневая система распределенных ситуационных центров региона, ориентированная на обеспечение региональной безопасности, и используемые ей средства информационно-аналитической поддержки управления. Для расширения возможностей систем поддержки принятия решений ситуационных центров региона разработаны формальный аппарат и средства автоматизации сетецентрического управления региональной безопасностью. Установлены объективные противоречия между возрастающими потребностями в повышении эффективности управления региональной безопасностью и применяемыми на практике средствами информационно-аналитической поддержки принятия решений в этой сфере. Предложена математическая постановка общей задачи сетецентрического управления региональной безопасностью, уточняющая содержание этой предметной области исследования с помощью конкретных формализмов и основанная на комбинированном применении технологии концептуального моделирования и формального аппарата теории управления организационными системами. Предложена технология поддержки принятия решений в условиях сетецентрического управления безопасностью, отличающаяся структурой и методом реализации формальных процедур прогнозирования и согласования показателей региональной безопасности в блоке принятия решений системы управления устойчивым развитием региона. *Результаты и выводы.* Представлена формальная концептуальная модель функционирования многоуровневой системы сетецентрического управления региональной безопасностью.

Abstract. *Background.* The objective of our research work is security control system efficiency enhancement of regional socio-economic systems under uncertainty conditions and decentralized decision-making. *Materials and methods.* As a subject of inquiry we analyze distributed situational center multi-level system of the region, which is oriented to regional security support, and software tools for management information and analytical support used by that system. For functionality and features expansion of decision support systems applied in the situational centers of the region a mathematical apparatus and automation tools for regional security network-centric control have been developed. The objective contradictions between increasing needs in efficiency enhancement of regional security control and applying in practice software tools for decision-making information and analytical support in this field of management have been established. The regional security network-centric control general problem statement mathematical formalization, defining concretely content of this research field by concrete formalisms and which is based on combination use of conceptual modeling technology and organizational system control theory formal apparatus, has been proposed. A decision-making support technology for regional security network-centric control, differing by the structure and implementation technique of prediction and coordination formal procedures of regional security indicators within the decision-making unit of the regional sustainable development control system, has been designed. *Results and conclusions.* A formal conceptual model of the regional security network-centric control multi-level system functioning has been represented.

¹ Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (тема НИР № 0226-2019-0035) и Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 18-07-00167-а, 18-29-03022-мк).

Ключевые слова: формализация, сетевое управление, региональная безопасность, информационная технология, поддержка принятия решений, модель.

Keywords: formalization, network-centric control, regional security, information technology, decision-making support, model.

Введение

В современных геополитических условиях эскалации международных интересов и борьбы мировых держав за контроль над ресурсами (территориальными, природными, кадровыми, информационными и т.д.) проблема формирования новой системы обеспечения комплексной безопасности региональных социально-экономических систем становится все более актуальной. Основная задача этой системы – повышение эффективности управления региональной безопасностью в условиях динамичной внешней среды и децентрализованной ситуационной осведомленности об обстановке на контролируемой территории (в регионе). Эта стратегическая задача является сегодня ключевым, критически важным направлением государственной политики России на международной арене [1].

Анализ отечественного и зарубежного опыта в области управления безопасностью региональных социально-экономических систем (РСЭС) позволил установить противоречие между возрастающими потребностями в повышении эффективности управления устойчивым развитием РСЭС с целью обеспечения региональной безопасности и недостаточными возможностями современных методов и средств поддержки принятия решений в этой сфере, на практике не обеспечивающих достаточную информационно-аналитическую поддержку управления безопасностью РСЭС как в организационном, так и в технологическом аспекте. Вместе с тем в теории наряду с имеющимися теоретическими разработками недостаточно разработаны методологические подходы к формализации и решению задач информационной поддержки и координации децентрализованного управления региональной безопасностью. Указанные противоречия обуславливают необходимость совершенствования существующих и создания новых формальных моделей и методов управления региональной безопасностью, а также подходов к интегральной оценке ситуационной осведомленности в условиях риска и неопределенности.

Учитывая скрытый характер воздействия, множественность форм проявления, высокую неопределенность и внезапность кризисных ситуаций в социально-экономической сфере, в решении задач управления безопасностью РСЭС, повышается роль методологии и инструментов компьютерного моделирования, базирующихся на разработке и исследовании полимодельных комплексов, обеспечивающих вариабельность проведения имитационных экспериментов на моделях РСЭС с целью сценарного анализа и прогнозирования динамики показателей региональной безопасности и их согласования на различных уровнях принятия управленческих решений. Оптимизация и планирование процессов управления региональной безопасностью на основе имитационных моделей позволяют минимизировать риски, временные и ресурсные затраты при подготовке и реализации оперативных и стратегических решений антикризисного управления, а также в опережающем порядке оценить последствия реализации этих решений при различных условиях и вариантах развития ситуации.

Для исследования способов повышения эффективности управления региональной безопасностью за счет развития средств информационно-аналитической поддержки принятия решений в работе предлагается использовать технологию концептуального моделирования сложных систем [2], которая позволяет формализовать, а в последующем и имитировать структуру и поведение многоуровневой распределенной системы управления региональной безопасностью. Формальный аппарат, реализованный в виде концептуальных моделей, является основой построения гибких систем автоматизации и имитационного моделирования процессов управления региональной безопасностью.

Основы методологии компьютерного моделирования для управления безопасностью и устойчивым развитием сложных социально-экономических объектов и систем, опирающиеся на теоретико-множественные, графовые и системно-динамические модели специального типа, а также технологии организационного управления и прогнозирования поведения этих объектов и систем, сформулированы и отражены в работах [3–7]. Представленные в статье результаты являются развитием данной методологии в направлении разработки формальных моделей и методов анализа и синтеза комплексных автоматизированных систем управления социально-экономической безопасностью в условиях региональных кризисных ситуаций, а также технологий информационной поддержки и координации процессов принятия решений с целью повышения эффективности управления безопасностью РСЭС.

Основные понятия и определения

В современной научной литературе региональная безопасность как социальное явление является сложным объектом комплексного изучения и трактуется с различных подходов в зависимости от рассматриваемых экономических, социальных, экологических и прочих аспектов региональной безопасности в каждом конкретном исследовании. При этом сам термин «*региональная безопасность*» определяется недостаточно четко. Разными исследователями в него вкладывается различный смысл. Такое многообразие обусловлено различными контекстами рассмотрения данного термина в рамках сложившихся теорий безопасности [3–5, 8–12], с одной стороны, и динамичностью самих этих теорий – с другой.

В настоящей работе термин «*региональная безопасность*» определяется как такое макросостояние защищенности региональной системы, при котором действие внешних и внутренних факторов не приводит к ухудшению или к невозможности ее функционирования и развития [7]. Другими словами, это такое свойство самосохранения системы, при котором она не теряет способности стабильно функционировать и развиваться в долгосрочной перспективе за счет активации механизмов компенсации и противодействия негативному влиянию внутренних (локальных) и внешних (глобальных) угроз устойчивого развития в условиях возникновения разнотипных кризисных ситуаций.

К внутренним угрозам устойчивого развития относятся, например, демографические проблемы (миграция), истощение ресурсной базы, проблемы кадрового обеспечения и т.д., а к внешним – глобальное изменение климата, международное санкционное преследование, бюджетно-финансовые проблемы, «падение рынка» (ухудшение инвестиционного климата), колебания курсов валют и цен на мировом рынке и др.

Региональная кризисная ситуация – обстановка на определенной территории, сложившаяся в результате возникновения опасных явлений социально-экономического, геополитического, техногенного или природного характера, которая повлекла за собой изменение состояния региональной экономики, угрожающее развитию региона.

Под макросостоянием защищенности социально-экономического развития региона понимается многоструктурное состояние региональной системы, характеризующее общее состояние основных региональных элементов, подсистем и структур управления и отношений между ними. Это сложное состояние, определяющее уровень безопасности развития региона, представляет собой множество согласованных устойчивых состояний элементов и подсистем РСЭС.

Параметры вектора состояний компонентов РСЭС, определяющие ее состояние защищенности, оцениваются в многомерном пространстве критериев. Областью безопасности РСЭС является пространство устойчивых состояний элементов и подсистем РСЭС. Движение РСЭС в этой области определяется как поступательное (безопасное) развитие региона.

Проблематика управления региональной безопасностью определяется отсутствием полной информации о состоянии системы (ситуации), ее окружении и взаимодействии в заданный момент времени; невозможностью полного учета всех факторов (угроз) и четкого определения плана действий для всех возможных вариантов развития ситуации; наличием плохо формализуемых и трудно поддающихся автоматизации начальных этапов жизненного цикла развития кризисных ситуаций; наличием множества различных аспектов, влияющих на принятие управленческих решений в сфере обеспечения региональной безопасности (политических, экономических, социальных, организационных, нормативно-правовых и др.). Специфики добавляют децентрализация и динамичность структуры и состава участников процессов обеспечения безопасности региона, а также региональные особенности. Поэтому современные модели и методы управления региональной безопасностью требуют адаптации и совершенствования.

Кризисные ситуации в социально-экономической сфере характеризуются высокой неопределенностью, неоднородностью, внезапностью и медленным нарастанием, а также отложенностью результатов воздействия. Для таких ситуаций не может быть все заранее учтено и расписано. Для превентивного управления рисками и нейтрализации последствий таких ситуаций необходимо принимать быстрые и эффективные управленческие решения в очень ограниченное время. Это обуславливает необходимость перехода на модель сетецентрического управления безопасностью региона.

Сетецентрическое управление региональной безопасностью заключается в реализации сетевой структуры организационного управления с выделенными управляющими центрами [13], взаимодей-

ствие между которыми осуществляется на базе их интеграции в единое региональное информационное пространство. Сетевый подход наиболее адекватно отражает реальную природу управления социально-экономическими системами и учитывает децентрализованный характер процессов обеспечения региональной безопасности как по функциональной структуре, так и по составу участников. Такой подход к управлению безопасностью социально-экономических систем ранее не применялся. Делались попытки управлять региональной безопасностью централизованно, но это не обеспечило нужного эффекта. Технологическая реализация системы сетевого управления региональной безопасностью на практике возможна на базе мультиагентных технологий [14]. Это обусловлено тремя факторами: высокой динамичностью среды функционирования субъектов управления, необходимостью координации децентрализованного принятия решений и учета человеческого фактора в управлении, что согласуется с концепцией мультиагентных систем.

Формализация понятия «региональная безопасность»

Для формализации понятия «региональная безопасность» в работе вводится матрица региональной безопасности. Количество столбцов матрицы соответствует числу учитываемых в интегральной оценке состояния безопасности развития региона составляющих региональной безопасности (экономическая, экологическая, кадровая, социальная, инновационная и др.), а число строк – количеству показателей каждой составляющей с максимальным набором параметров. Каждый элемент матрицы представляет собой вектор-функцию параметров для конкретной составляющей безопасности, либо скалярную величину. Исследована возможность применения векторных и лингвистических переменных в качестве элементов матрицы. На этапе моделирования матрица региональной безопасности обеспечивает основу для исследования и построения сценариев достижения требуемого (желаемого) или допустимого уровня безопасности развития РСЭС.

Сложная система имеет область устойчивых состояний $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ и матрицу переходов из одного устойчивого состояния в другое $M_{n \times n}$. Каждое устойчивое состояние системы характеризуется значениями некоторого набора параметров $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$, где $\forall s_i \in S, p_i = \{p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{ik}\}$ – значения параметров i -го устойчивого состояния. Причем значения каждого параметра должны лежать в определенном диапазоне, который может зависеть от значений остальных параметров, а также от времени (t):

$$\forall P_{ij} \in [f_{\min}(p_{ij}, P(t)), f_{\max}(p_{ij}, P(t))]. \quad (1)$$

$\forall m_{ij} \in M, \exists C_{ij} = \{p_1^{ij}, p_2^{ij}, \dots, p_r^{ij}\}$ – цена перехода из состояния s_i в состояние s_j , причем $\{p_1^{ij}, p_2^{ij}, \dots, p_r^{ij}\} \subseteq P$. Тогда любой переход будет сопровождаться затратами или высвобождением (накоплением) ресурсов из набора C_{ij} . Запас ресурсов системы RS зависит от ее состояния и от времени $RS = f(S, t)$. Следовательно, элементы матрицы M (кроме элементов главной диагонали) будут также зависеть от запаса ресурсов и от времени.

Когда система переходит из одного устойчивого состояния в другое, происходит изменение значений данных параметров. Чтобы оценить качество каждого перехода системы, необходимо ввести критерий как функцию от параметров каждого устойчивого состояния системы:

$$K = f(P) \Rightarrow Ks_i = f(p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{ik}). \quad (2)$$

Матрица региональной безопасности представляет собой матрицу устойчивых состояний РСЭС, которая позволяет определить возможные стратегии перехода системы из начального устойчивого состояния некоторого цикла ее развития в его конечное устойчивое состояние за ограниченное время с положительным приращением критериальной функции, позволяющей оценить каждый переход системы с точки зрения целей моделирования динамики ее развития, т.е. матрица региональной безопасности обеспечивает синтез траекторий движения системы в пространстве устойчивых состояний.

Матрица $M_{n \times n}$:

$$M = \begin{pmatrix} \emptyset & m_{12}(RS, rk, t) & \dots & m_{1n}(RS, rk, t) \\ m_{21}(RS, rk, t) & \emptyset & \dots & m_{2n}(RS, rk, t) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ m_{n1}(RS, rk, t) & m_{n2}(RS, rk, t) & \dots & \emptyset \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где $RS = f(S, t)$ – требуемые для перехода ресурсы; $rk = f(P, t)$ – вероятность перехода; t – время перехода.

Цикл развития системы ограничен по времени и по величине приращения критериальной функции. Началом цикла будем считать устойчивое состояние s_1 , окончанием – s_g . Устойчивому поступательному (безопасному) развитию системы будет соответствовать кортеж согласованных во времени элементов матрицы M : $M_{RSD} = \langle m_1(t_1), m_2(t_2), \dots, m_g(t_g) \rangle$, $M_{RSD} \subset M$, для которого выполняется следующая система неравенств:

$$\delta t_{\min} \leq t_g - t_1 \leq \delta t_{\max}, \quad (4)$$

$$\delta K_{\min} \leq K(m_g) - K(m_1) \leq \delta K_{\max}, \quad (5)$$

где δt_{\min} , δt_{\max} – границы временного интервала цикла развития; δK_{\min} , δK_{\max} – границы значений критериальной функции.

При этом все переходы между устойчивыми состояниями внутри цикла развития должны быть согласованы во времени и удовлетворять ограничениям на наличие ресурсов. При оценке состояния защищенности, характеризующего уровень безопасности развития РСЭС, должны также учитываться такие факторы как несимметричность переходов, время переходов и их характер, влияние внешней среды, идентификация границ и взаимосвязей циклов развития. Для координации показателей состояния компонентов РСЭС, представленных в матрице региональной безопасности и оптимизируемых различными элементами системы регионального управления, используется математический аппарат теории иерархических многоуровневых систем [15] и механизмы согласования индикаторов социально-экономического развития региона [16].

Вербальная постановка задачи

На содержательном уровне суть решаемой в работе задачи сетцентрического управления региональной безопасностью заключается в следующем:

известно:

- реализуемая стратегия регионального развития;
- текущее состояние социально-экономического развития региона;
- перечень показателей, по которым оцениваются различные аспекты безопасности региона, то есть определена система показателей региональной безопасности и диапазон допустимых значений;
- структура и состав действующей в регионе системы обеспечения региональной безопасности (количество ситуационных центров, субъекты безопасности, цели и задачи субъектов, характеристика критически важных объектов региона, информационные и иные ресурсные потребности субъектов управления, организационные и технические регламенты взаимодействия субъектов на разных уровнях системы регионального управления т.д.);
- структура и состав социально-экономической системы региона и системы регионального управления;
- пространственно-временные, технологические, организационно-технические, нормативно-правовые и прочие ограничения, связанные с процессами обеспечения региональной безопасности (в соответствии с паспортом региональной безопасности);
- перечень внутренних и внешних угроз региональной безопасности (допустимые варианты сценариев воздействия на элементы и подсистемы регионы, влияющие факторы);

- планы антикризисных мероприятий в условиях возникновения чрезвычайных и кризисных ситуаций;
- модели организационных структур управления безопасностью региона в типовых критических ситуациях.

Требуется найти: такую последовательность согласованных управляющих воздействий на параметры, элементы и подсистемы региональной социально-экономической системы, при которой для каждой области региональной безопасности с заданными характеристиками обеспечивается рациональный (гарантированный) переход данной системы из текущего в требуемое (желаемое) безопасное макросостояние.

Для этого необходимо:

- 1) оценка уровня региональной безопасности на основе формирования и анализа интегрального показателя безопасности региона, представляющего собой матрицу показателей региональной безопасности;
- 2) формирование спецификации организационных структур управления безопасностью, ориентированных на оптимизацию соответствующих показателей для каждой области региональной безопасности, с учетом заданных ограничений и текущего состояния развития региона;
- 3) оценка эффективности (качество) синтезированных структур в плане достижения глобальной цели управления безопасностью региона – перехода системы в требуемое (желаемое) безопасное состояние.

Управление региональной безопасностью представляет собой сложный многоэтапный процесс и по своей структуре многофункциональный. На каждом этапе для реализации соответствующих функций управления необходимы свои средства информационно-аналитической поддержки принятия решений, адекватные решаемым задачам управления региональной безопасностью. Эти средства должны быть ориентированы на непрограммирующего пользователя, учитывать его активность и сферы интересов, обеспечивать автоматизированный выбор методов решения поставленных задач, сопровождать процесс выработки и реализации управленческих решений в рекомендательном режиме.

Формализация общей задачи сетцентрического управления безопасностью региона

Общая математическая постановка задачи управления региональной безопасностью может быть формализована в классической для теории управления форме [6] (рис. 1), которая адаптирована для задач управления системами различной природы. В общем случае задача сводится к поиску такого допустимого управления, которое имеет максимальную эффективность и определяет оптимальную траекторию «движения» РСЭС в пространстве устойчивых состояний. Для оценки состояний используются показатели, образующие матрицу региональной безопасности.

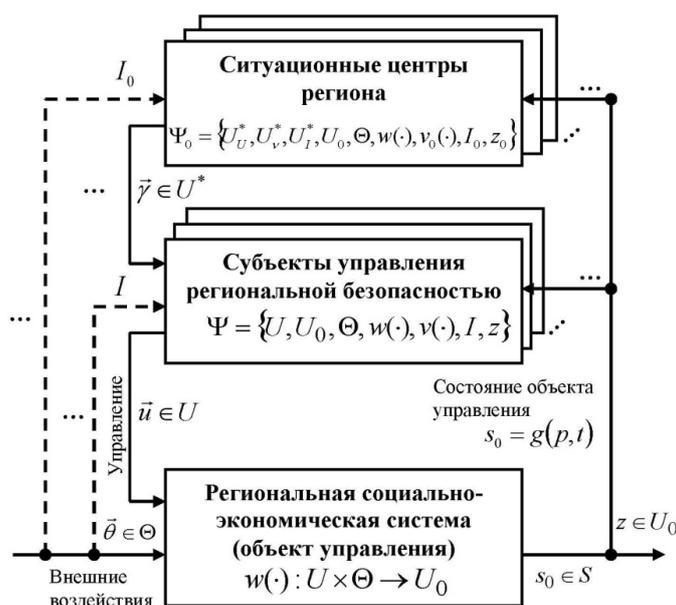


Рис. 1. Модель задачи сетцентрического управления региональной безопасностью

Эффективность управления

$$G[s(p,t),u(t),\theta(t)] \rightarrow \min_{u \in U}, \tag{6}$$

где $u \in U$ – вектор управлений, $s \in S$ – состояния объекта управления, $p \in P$ – значения параметров, описывающих состояния объекта управления (показатели безопасности региона), $\theta \in \Theta$ – внешние воздействия на объект управления (угрозы безопасности и негативные факторы), t – параметр времени.

Модель субъекта управления

$$\Psi = \{U, U_0, \Theta, w(\cdot), v(\cdot), I, z\}, \tag{7}$$

где U – множество управляющих воздействий (стратегия деятельности субъекта); $U_0 \subseteq U$ – множество управляющих воздействий, выбираемых субъектом управления; $w(\cdot)$ – зависимость результатов деятельности субъекта управления от управляющих воздействий и внешнего окружения объекта управления, то есть $w(\cdot): U \times \Theta \rightarrow U_0$; $v(\cdot)$ – функция полезности, задающая предпочтения субъекта управления на множестве возможных результатов его целенаправленной деятельности; I – информация о текущей обстановке (внешнем окружении объекта управления), которой обладает субъект управления на момент принятия решений о выбираемом управляющем воздействии; $z = w(u, \Theta)$, $z \in U_0$ – результат деятельности субъекта управления при выбранном управляющем воздействии (показатели качества функционирования элементов и подсистем РСЭС).

Модель принятия решений управляющим ситуационным центром региона в целом аналогична модели принятия решений субъектом управления и формально описывается в виде кортежа $\Psi_0 = \{U_U^*, U_V^*, U_I^*, U_0, \Theta, w(\cdot), v_0(\cdot), I_0, z_0\}$, где $\gamma = (\gamma_U, \gamma_V, \gamma_I) \in U^* = U_U^* \times U_V^* \times U_I^*$ – вектор управлений, являющихся «действиями» центра по отношению к объекту и субъектам управления.

Таким образом, регион становится объектом управления, а задача обеспечения региональной безопасности – это задача оптимального управления в условиях параметрических возмущений внешней среды (социально-экономического окружения региона). Для оптимального управления необходимо контролировать параметры внешней среды и разработать алгоритмы компенсации возмущений для организации обратной связи для стабилизации объекта управления (рис. 2).

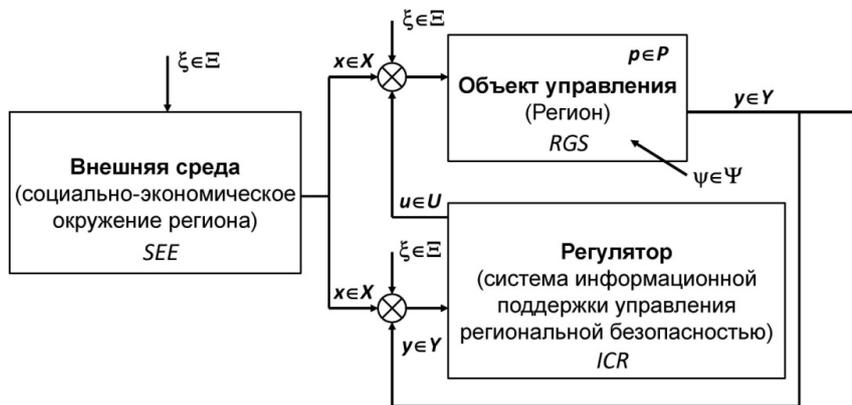


Рис. 2. Общая схема задачи сетцентрического управления региональной безопасностью

В качестве регулятора для компенсации возмущений предлагается использовать инструмент информационной поддержки, представляющий собой многофункциональную расширяемую информационную среду региональной безопасности [7], обеспечивающую формирование условий для целенаправленного поведения объекта управления.

Под информационной поддержкой понимается механизм управления, при котором управляющее воздействие носит неформализованный характер, и субъекту управления предоставляется информация о ситуации, ориентируясь на которую он получает возможность корректировать как свое поведение, так и объекта управления.

Тогда математическая постановка задачи представляется в следующем виде:

Дано:

1. Объект управления – регион: множество региональных элементов и подсистем $RGS = \{RGS_i\}$.

2. Множество параметрических возмущений внешней и внутренней среды региона RGS : $\xi = \{\varepsilon(\alpha(t)), \varepsilon(\beta(t)), \varepsilon(\delta(t)), \varepsilon(\rho(t)), \varepsilon(\phi(t)), \varepsilon(\gamma(t)), \varepsilon(\eta(t)), \varepsilon(v(t))\}$, где t – параметр времени.

Параметрические возмущения (ξ):

$\varepsilon(\alpha(t))$ – нарушение социальной стабильности RGS ;

$\varepsilon(\beta(t))$ – нарушение экологической устойчивости RGS ;

$\varepsilon(\delta(t))$ – нарушение макроэкономического равновесия RGS ;

$\varepsilon(\rho(t))$ – ухудшение инвестиционного климата в регионе RGS ;

$\varepsilon(\phi(t))$ – дефицит кадров (снижение кадрового потенциала) RGS ;

$\varepsilon(\gamma(t))$ – демографические проблемы (миграционный отток населения) RGS ;

$\varepsilon(\eta(t))$ – снижение инновационной активности (темпов технологического роста) RGS ;

$\varepsilon(v(t))$ – нарушение энергетической безопасности RGS (обеспечения бесперебойного доступа к энергоресурсам по приемлемой цене для потребителя и износ энергосистем).

3. Внешняя среда SEE (социально-экономическое окружение региона, включающее хозяйствующие субъекты, управляющие элементы федерального уровня, глобализационные процессы, нормативно-правовое поле, мировые тенденции, международные политические аспекты и т.д.), подверженная влиянию разнородных факторов ξ и осуществляющая прямое или косвенное воздействие x на объект управления (регион).

4. Множество общих требований к социально-экономическому окружению региона (параметрам внешней и внутренней среды): $Tr = \{\alpha_{Tr}, \beta_{Tr}, \delta_{Tr}, \rho_{Tr}, \phi_{Tr}, \gamma_{Tr}, \eta_{Tr}, v_{Tr}\}$.

Пусть M означает модель гипотетической макросистемы в операторном виде. Тогда формально ее можно описать следующим образом:

$$M : X \times \Xi \times U \times P \times \Psi \times [0, T] \rightarrow Y, \tag{8}$$

где $[0, T]$ – период функционирования (цикл развития) системы; « \times » – знак декартова произведения.

Внешние $\xi \in \Xi$ и внутренние $\psi \in \Psi$ факторы (угрозы и опасности) оказывают влияние на поведение системы через переменные $x \in X$ и параметры $p \in P$ с помощью некоторых известных механизмов: $x = x(\xi)$ и $p = p(\psi)$. Если M допускает описание в форме дифференциальных уравнений, тогда модель системы имеет вид

$$x' = f(x(\xi), u, p(\psi), y, t), \tag{9}$$

где f – известная вектор-функция, $x(\xi), u, p(\psi), y$ – векторы множеств X, U, P и Y соответственно с начальными условиями $y(t_0) = y_0$.

Найти:

1) множество моделей оценки параметров внешней и внутренней среды SEE и P , характеризующих безопасность региона RGS :

$$\mu(t) = \{\alpha(t), \beta(t), \delta(t), \rho(t), \phi(t), \gamma(t), \eta(t), v(t)\}, \tag{10}$$

$y \in Y$ – состояние защищенности RGS (региональная безопасность); $\mu(t)$ – функция оценки защищенности (безопасности) RGS ;

2) множество алгоритмов $A(t) = \{A_i(t)\}$, обеспечивающих стабилизацию объекта управления и образующих его структурных подсистем $RGS = \{RGS_i\}$, т.е. позволяющих при реализации обеспечивать такое управление $u \in U$, при котором воздействия ξ , ψ и x компенсируются и результирующая защищенность (безопасность) $y \in Y$ находится в допустимых пределах;

3) модель социально-экономической системы $RGS = \{RGS_i\}$, описывающую регион с точки зрения состава параметров состояния (показателей) и информации, необходимой для принятия эффективных управленческих решений по обеспечению безопасности региона;

4) регулятор $ICR (RGS)$, представляющий собой информационно-управляющую систему обеспечения региональной безопасности и реализующий функцию контроля параметрических возмущений ξ и ψ , действующих на объект управления через $SEE (x)$, а также функцию стабилизации u объекта управления с помощью реализации соответствующих алгоритмов и программ управления $A(t)$;

5) множество подсистем $ICR (RGS)$: $ICRS = \{ICRS_i\}$ и элементов: $ICRE = \{ICRE_i\}$;

6) множество функций подсистем $ICR (RGS)$: $ICRSF = \{ICRSF_i\}$;

7) множество ограничений по критичности подсистем ICR (по времени выполнения $T_{RGS} = \{T_{RGS_i}\}$ и по критичности выполнения функционала $F_{RGS} = \{F_{RGS_i}\}$;

8) метод оценки эффективности функционирования внешней среды региона SEE и регулятора ICR , модели и методику оценки безопасности развития внутренней среды и региональных компонентов $RGS = \{RGS_i\}$.

Таким образом, задача обеспечения региональной безопасности представляет собой задачу стабилизации объекта управления (региона) по многим параметрам. Эта задача может быть сведена к задаче оптимального выбора по многим критериям.

Пусть безопасность региональных элементов и подсистем $\{RGS_i\}$ характеризуется функцией $\mu(t)$, значение которой представляет собой вероятность нахождения региона в состоянии безопасности в некоторый произвольный момент времени T . Тогда можно утверждать, что задача обеспечения региональной безопасности формулируется как задача достижения максимума функции $\mu(t)$ по t на произвольном временном интервале t (при $t \rightarrow \infty$), т.е. $M = \max_{t \in [t_0, \infty]} \mu(t)$.

Функция $\mu(t)$ определяется через частные функции: $\alpha(t)$ – оценка социальной напряженности в регионе в момент времени T ; $\beta(t)$ – оценка состояния окружающей среды региона в момент времени T ; $\delta(t)$ – оценка уровня развития региональной экономики в момент времени T ; $\rho(t)$ – оценка инвестиционной привлекательности региона в момент времени T ; $\phi(t)$ – оценка кадрового потенциала региона в момент времени T ; $\gamma(t)$ – оценка демографической ситуации в регионе в момент времени T ; $\eta(t)$ – оценка инновационного потенциала региона в момент времени T ; $\nu(t)$ – оценка уровня энергоемкости (запасов энергоресурсов) и износа энергосистем региона в момент времени T ; t_0 – начальный момент времени исследования системы.

Поскольку значения частных функций представляют собой вероятности, значение общей функции состояния безопасности также представляет собой вероятность, можно представить функцию $\mu(t)$ как взвешенную аддитивную свертку этих функций:

$$\mu(t) = \omega_1 \alpha(t) + \omega_2 \beta(t) + \omega_3 \delta(t) + \omega_4 \rho(t) + \omega_5 \phi(t) + \omega_6 \gamma(t) + \omega_7 \eta(t) + \omega_8 \nu(t), \quad (11)$$

где ω_i – весовые коэффициенты значимости соответствующей функции, $\sum_{i=1}^8 \omega_i = 1$.

Учитывая специфику объекта управления и размерность задачи, решить поставленную задачу аналитически или численно достаточно сложно. На практике существует несколько подходов к решению данной задачи, отличающихся механизмами реализации управления. Первый способ – это «жесткое» институциональное управление, предполагающее контроль ограничений и норм деятель-

ности, т.е. координацию управления на метауровне. Второй способ – это более «мягкое» мотивационное управление, предполагающее изменение функций полезности и предпочтений субъекта путем введения системы штрафов и поощрений за выбор тех или иных действий, то есть стимулирование деятельности субъектов управления. И наименее исследованный способ управления безопасностью и устойчивым развитием РСЭС – «мягкое» информационное управление, предполагающее изменение информации, которую использует субъект управления при принятии решений, т.е. адекватную ситуации информационно-аналитическую поддержку принятия решений. Для обеспечения эффективного функционирования многоуровневой распределенной системы сетецентрического управления региональной безопасностью перечисленные механизмы управления должны использоваться одновременно, поскольку комбинированное управление предназначено для сложных динамических систем различной природы и масштаба, в которых можно выделить детерминированную часть, поддающуюся детальному анализу, расчету и жесткому планированию, и недетерминированную, для которой такой анализ практически невозможен. К таким системам относятся и РСЭС. Для решения формализованной выше задачи разработаны модели и методы, представленные в работе [7] и обеспечивающие формальную основу имитационного моделирования, автоматизации и координации процессов принятия управленческих решений в сфере региональной безопасности. Эти разработки использованы для реализации информационной технологии сетецентрического управления региональной безопасностью [17] и системы поддержки принятия решений в условиях региональных кризисных ситуаций [18].

Технология поддержки принятия решений по управлению безопасностью региона

Принятие решений является одним из китов, на которых держится управление. Упрощенно управление рассматривается как последовательность выработки, принятия и реализации решений. От решения во многом зависит будущее объекта управления. Своевременные и «правильные» решения – залог безопасности и устойчивого развития социально-экономических систем, обеспечение чего в особенности важно для экономики и обороноспособности страны. Принятие решений не является одномоментным актом, а представляет собой сложный многоэтапный процесс. Согласно работе [19] технология принятия решений включает три основных этапа: сбор информации, поиск и нахождение альтернатив, выбор лучшей альтернативы.

На первом этапе с применением современных средств мониторинга собирается вся доступная на момент принятия решения информация о некоторой ситуации: фактические оперативные данные, статистическая и экспертная информация. Второй этап связан с определением того, что можно, а чего нельзя делать в имеющейся ситуации, т.е. с определением вариантов решений (альтернатив). Третий этап включает в себя сравнение альтернатив и выбор наилучшего варианта (или вариантов) решения. При использовании автоматизированных средств поддержки принятия решений технологию принятия решений (рис. 3) целесообразно дополнить еще двумя этапами: этапом формализации задач и этапом визуализации «подготовленного» экспертами варианта для предъявления лицу, принимающему решение (ЛПР). Формализация подразумевает «перевод» сформулированной ЛПР задачи на язык, «понятный» компьютеру, представление ее в виде, допускающем только однозначную интерпретацию. Визуализация призвана обеспечить обратную процедуру – перевод спецификации решения, полученной на формальном компьютерном языке, в представление, понятное и легко интерпретируемое ЛПР.

При исследовании крупномасштабных динамических систем, к которым относятся региональные социально-экономические системы, возможности сбора информации путем наблюдений, натурных измерений и экспериментов существенно ограничены, и преобладающую роль на этом этапе играет компьютерное моделирование и специальные средства мониторинга и автоматизации управления. Компьютерное моделирование является основным инструментом, помогающим на основе прогнозирования не только получить обоснования для стратегических решений и сформировать программы их реализации, но и обеспечить анализ хода реализации программ, оценку степени критичности возникающих отклонений от намеченных траекторий развития и при необходимости оперативный поиск корректирующих воздействий. Обобщенные результаты исследований в области разработки и применения информационных технологий и компьютерного моделирования для задач поддержки принятия управленческих решений в сфере управления региональным развитием представлены в работах [2, 7].

Структурно и функционально схожая информационная технология поддержки принятия решений, но основанная на комбинированном использовании методов системно-динамического и мультиагентного имитационного моделирования [20], реализована для задач сетецентрического управления региональной безопасностью. В частности, технология обеспечивает оценку состояния

критически важных объектов (КВО) региональной экономики и предназначена для использования в составе систем поддержки принятия решений в ситуационных центрах региона.



Рис. 3. Структура технологии принятия решений при использовании средств информационно-аналитической поддержки

Общая схема принятия решений по оценке состояния КВО региона на основе предлагаемой технологии в региональном ситуационном центре показана на рис. 4.

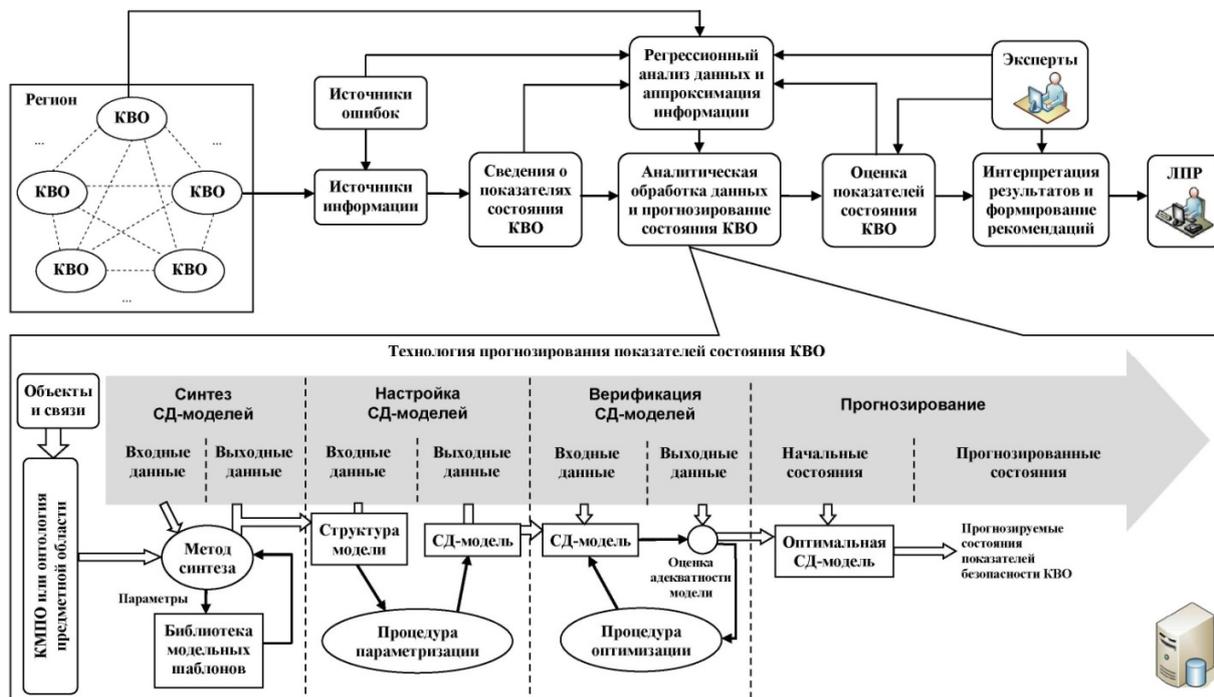


Рис. 4. Общая схема принятия решений по оценке состояния КВО в региональном СЦ: ЛПР – лицо, принимающее решение; КМПО – концептуальная модель предметной области; СД-модель – системно-динамическая модель

Технология реализуется в пять этапов:

- 1) сбор первичной информации о состоянии КВО региона в условиях возникновения кризисных ситуаций;
- 2) аналитическая обработка и аппроксимация информации о критических ситуациях на КВО региона с применением средств интеллектуального анализа данных;

3) сценарное моделирование динамики состояния КВО и анализ вариантов развития кризисных ситуаций с комбинированным применением методов системной динамики [21] и энтропийно-робастного рандомизированного прогнозирования [22];

4) оценка интегральных показателей состояния КВО и последствий (ущерба) воздействия неблагоприятных факторов;

5) интерпретация результатов и формирование рекомендаций (программ управления) ЛПР.

Источниками информации о состоянии КВО региона являются: ведомственные и корпоративные информационные системы, базы и картотеки данных ФСТЭК, ФСБ, МВД, Федеральной службы государственной статистики, файловые системы и электронные архивы Минэкономразвития, Минприроды и других органов государственной власти и организаций региона, а также открытые веб-ресурсы, картографическая информация, контент социальных сетей, каналы аудио- и видеoinформации, экспертные данные и научно-техническая документация. Эта информация поступает на вход системы поддержки принятия решений, которая функционирует на основе предлагаемой технологии. Информация может быть представлена как в структурированном, так и в неструктурированном виде, а также может быть неполной, поскольку зачастую на практике не все показатели безопасности поддаются точному количественному измерению.

Информация, требуемая для принятия управленческих решения, характеризуется, как правило, объемом и неопределенностью. Эти показатели взаимосвязаны. Неопределенность информации выражается через энтропию и заключается в том, что не все значения параметров управляемой системы неизвестны на момент принятия решения. Таким образом, процедура принятия решений представляет собой итеративный процесс последовательного разрешения неопределенности информации путем ее обработки и анализа.

Информацию, используемую в процессе принятия решений, можно условно разделить на три группы [3]:

1) потенциально готовая к использованию информация, заранее накопленная в системе управления. Неопределенность этой информации характеризуется ее неполнотой, неполной достоверностью и неполным соответствием содержанию решения. Эта информация используется, когда отсутствует резерв времени на полный сбор и обработку сведений о параметрах объекта управления, либо в случае, когда такие данные трудно доступны;

2) оперативная информация, получаемая непосредственно в процессе принятия решений. Эта новая информация генерируется путем аналитической обработки всей известной информации об объекте управления или ситуации с использованием методов интеллектуального анализа данных и прогнозирования, а также формальных моделей предметной области;

3) информация, которая не может быть получена какими-либо объективными методами. Неопределенность этой информации называется остаточной неопределенностью решения и разрешается путем субъективного выбора (волевым решением).

Информационный мониторинг проводится в режиме, максимально приближенном к реальному времени, и сопровождается контролем целостности входных данных и проверкой их достоверности. Сбор первичной информации осуществляется с применением автономных программных агентов [14]. После получения, регистрации и обработки первичной информации о потенциальных источниках угроз на КВО региона и возможных кризисных ситуациях выполняется передача результатов предобработки в операционное ядро системы поддержки принятия решений для дальнейшего учета и анализа.

Центральным этапом технологии поддержки принятия решений является процедура моделирования и прогнозирования. Технически этот функциональный блок реализован в виде полимодельного комплекса, представляющего собой взаимосвязанную совокупность компьютерных моделей [23], обеспечивающих вариабельность проведения имитационных экспериментов с целью исследования различных сценариев развития кризисных ситуаций, оценки рисков, выявления тенденций и формирования антикризисных программ управления. Основные задачи на этом этапе технологии – прогноз динамики показателей безопасности социально-экономической системы региона и синтез моделей взаимодействия и координации субъектов управления в условиях известных и вновь возникающих кризисных ситуаций. Принятие решения осуществляется по полученным прогнозным оценкам состояния КВО региона, которые формируются на основе множества признаков, представленных в виде концептуального пространства (признакового описания ситуаций) [24].

Блок-схема метода совмещенного формирования и оценки интегрального показателя безопасности региона, реализуемого в рамках предлагаемой технологии, приведена на рис. 5.

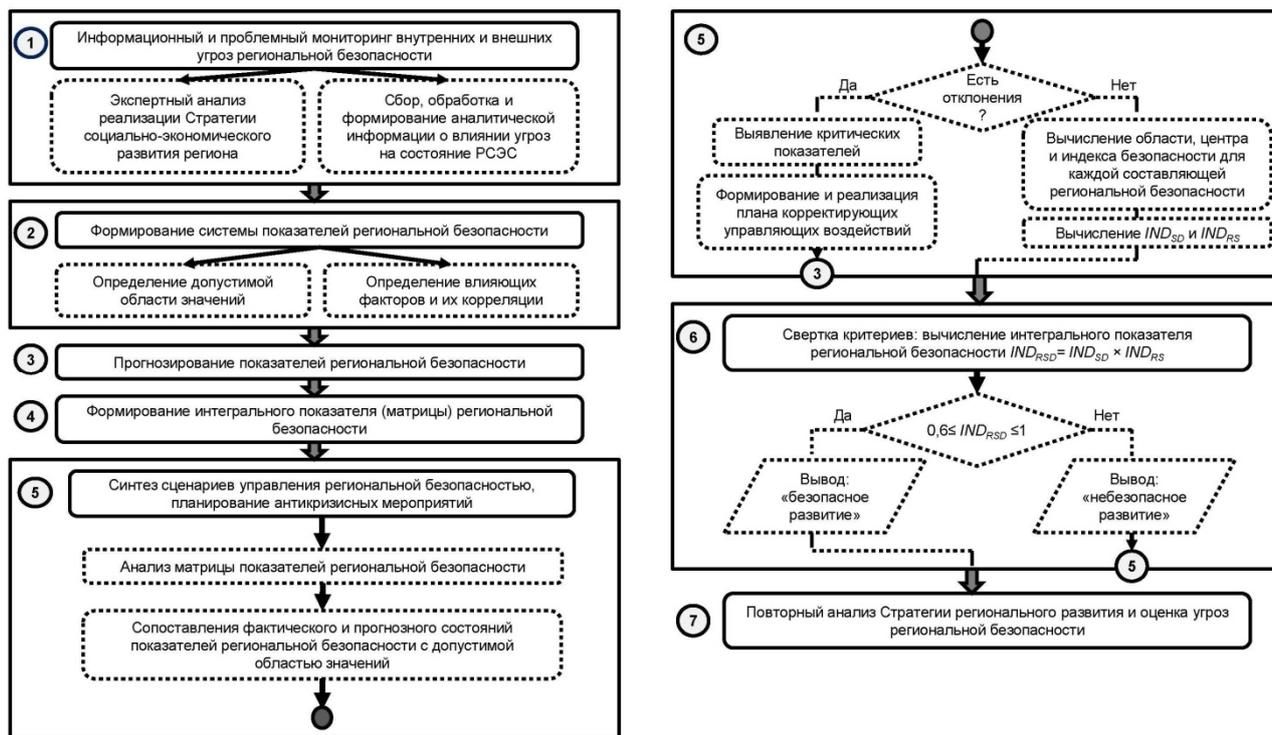


Рис. 5. Структура метода интегральной оценки региональной безопасности

Процесс функционирования РСЭС представляется последовательностью смены состояний КВО региона, которые определяются вероятностным сценарием возникновения и развития неблагоприятных событий. Поэтому в общем случае задача определения состояния КВО региона (а по нему и текущей ситуации) по регистрируемым признакам относится к задачам классификации. При этом зависимость состояния КВО от вектора наблюдений носит вероятностный характер и определяет возможный класс ситуаций, к которому относится неблагоприятное событие. Для классификации состояния КВО региона в предлагаемой технологии поддержки принятия решений по наблюдаемым значениям концептуального пространства совместно используются специальные методы когнитивной категоризации и ситуационного моделирования, предложенные в работах [24, 25] и позволяющие учитывать динамику изменения состояний КВО. Классификация и обобщение ситуаций осуществляется путем определения их сходства с прототипом. Экземпляры выше некоторого порога сходства с прототипом принимаются как члены категории, все остальные экземпляры не являются членами. Прототипом не всегда служит один из реальных экземпляров, входящих в категорию, это может быть и некоторый идеальный набор значений атрибутов. Вероятности возникновения неблагоприятных событий определяются на основе: теоретических выводов, экспертных оценок, статистических данных.

В рамках технологии отдельным блоком с привлечением компетентных экспертов и системных аналитиков соответствующего профиля реализуются процедуры:

- экспертного анализа реализуемой региональными органами управления стратегии социально-экономического развития региона с целью определения задач и проблем региональной безопасности;
- формирования системы показателей региональной безопасности, определения допустимой области их значений и единиц измерения, влияющих факторов и их корреляции для каждой составляющей региональной безопасности.
- синтеза сценариев управления безопасностью региона в условиях критических ситуаций на основе анализа матрицы показателей региональной безопасности и выбора оптимального сценария антикризисных мер, адекватного этим ситуациям.

Заключение

Информационная поддержка управленческой деятельности в сфере обеспечения региональной безопасности непосредственно связана с внедрением интеллектуальных систем поддержки принятия решений в ситуационные центры региона. Сеть большая, много управляющих центров и всем необходимо оперативно предоставить информацию, точно соответствующую ситуации, которая спонтанно сложилась или возникнет на треке развития РСЭС, для принятия согласованных решений. Аспектов региональной безопасности много и они очень разнообразные. Их необходимо увязать в единое целое для оценки ситуационной осведомленности в процессе принятия решений. Применение сетецентрического подхода к решению этой сложной многогранной проблемы представляется перспективным, поскольку при такой модели управления обеспечивается повышение оперативности поиска, получения, передачи и децентрализованной обработки требуемой информации для принятия решений по сравнению с жестким централизованным управлением, либо с ситуацией, когда средства поддержка принятия решений вовсе не применяются. Эффективность достигается за счет координации локальных решений сетецентрического управления на всех уровнях принятия решений. Для реализации такого подхода разрабатываются формальный аппарат и средства автоматизации синтеза систем сетецентрического управления региональной безопасностью.

В ходе исследования получены следующие основные результаты:

1. Установлены объективные противоречия между нарастающими потребностями в повышении эффективности управления безопасностью РСЭС, динамично меняющимися требованиями к системам обеспечения региональной безопасности и современными средствами информационно-аналитической поддержки принятия решений в этой сфере.

2. Выявлены недостатки сложившихся теоретико-методологических подходов к управлению безопасностью социально-экономических систем, заключающиеся в отсутствии формальной постановки общей задачи децентрализованного управления региональной безопасностью и единой методологии ее комплексного решения, а также в недостаточной научной проработке вопросов, связанных с формированием интегральной оценки ситуационной осведомленности о влиянии разнородных факторов на состояние РСЭС и измерением интегрального показателя безопасности региона.

3. Предложены конкретизация и математическая формализация терминов в сфере управления региональной безопасностью, уточняющая содержание этой предметной области исследования с помощью конкретных формализмов, что расширяет понятийный аппарат теории безопасности сложных систем и делает его более конструктивным в приложении к задачам построения адекватных систем управления и поддержки принятия решений в этой области.

4. Разработана обобщенная математическая постановка задачи сетецентрического управления региональной безопасностью, основанная на комбинированном использовании технологии концептуального моделирования и формального аппарата теории управления организационными системами.

5. Предложена общая схема технологии поддержки принятия решений в сфере управления региональной безопасностью, отличающаяся структурой и методом реализации аналитической подсистемы прогнозирования и оценки показателей состояния КВО региона в блоке принятия решений системы управления безопасностью РСЭС, а также наличием формальных процедур согласования локальных решений сетецентрического управления по оптимизации этих показателей на всех уровнях принятия решений. Аналитическая подсистема совместно использует методы системной динамики и энтропийно-робастного рандомизированного прогнозирования для сценарного моделирования динамики состояния КВО и анализа вариантов развития кризисных ситуаций. Согласование децентрализованных управленческих решений и целевых функций субъектов управления осуществляется на основе метода координации путем развязывания взаимодействий между управляющими центрами и формирования коалиций (путем самоорганизации) между агентами (активными элементами многоуровневой системы управления).

6. Разработана формальная модель системы сетецентрического управления сложными распределенными объектами, адаптированная и расширенная на задачи обеспечения безопасности социально-экономических систем регионального уровня.

Полученные результаты использованы при реализации «Стратегии развития Арктической зоны РФ и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года» на территории Мурманской области в части формирования информационной инфраструктуры комплексной автоматизированной системы управления региональной безопасностью.

Дальнейшие направления исследований связаны с разработкой комплексной методологии математического и компьютерного моделирования многоуровневых систем сетецентрического управления безопасностью РСЭС и совершенствованием существующих моделей организации функционирования системы распределенных ситуационных центров региона на основе сетецентрического подхода и мультиагентных технологий.

Библиографический список

1. *Смирнов, А. И.* Современные информационные технологии в международных отношениях / А. И. Смирнов. – Москва : МГИМО-Университет, 2017. – 334 с.
2. *Емельянов, С. В.* Информационные технологии регионального управления / С. В. Емельянов, А. Г. Олейник, Ю. С. Попков, В. А. Путилов. – Москва : Едиториал УРСС, 2004. – 400 с.
3. *Цыгичко, В. Н.* Безопасность критических инфраструктур / В. Н. Цыгичко, Д. С. Черешкин, Г. Л. Смолян. – Москва : УРСС, 2019. – 200 с.
4. *Северцев, Н. А.* Системный анализ теории безопасности / Н. А. Северцев, А. В. Бецков. – Москва : Изд-во МГУ «ТЕИС», 2009. – 457 с.
5. *Шульц, В. Л.* Сценарный анализа в управлении геополитическим информационным противоборством / В. Л. Шульц, В. В. Кульба, А. Б. Шелков, И. В. Чернов. – Москва : Наука, 2015. – 542 с.
6. *Новиков, Д. А.* Теория управления организационными системами / Д. А. Новиков. – 3-е изд., испр. и доп. – Москва : Физматлит, 2012. – 604 с.
7. *Маслобоев, А. В.* Информационное измерение региональной безопасности в Арктике / А. В. Маслобоев, В. А. Путилов. – Апатиты : КНЦ РАН, 2016. – 222 с.
8. *Бурков, В. Н.* Модели и методы управления безопасностью / В. Н. Бурков, Е. В. Грацианский, С. И. Дзюбко, А. В. Щепкин. – Москва : Синтег, 2001. – 139 с.
9. *Рябинин, И. А.* Надежность и безопасность сложных систем / И. А. Рябинин. – Санкт-Петербург : Политехника, 2000. – 248 с.
10. *Юрков, Н. К.* Безопасность сложных технических систем / Н. К. Юрков // Вестник Пензенского государственного университета. – 2013. – № 1. – С. 128–134.
11. *Малинецкий, Г. Г.* Управление риском. Риск, устойчивое развитие, синергетика / Г. Г. Малинецкий. – Москва : Наука, 2000. – 432 с.
12. *Попов, Н. С.* Методологические основы теории безопасности / Н. С. Попов, Н. В. Лузгачева, А. Хайри // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2010. – № 10-12 (31). – С. 10–28.
13. *Игнатъев, М. Б.* Просто кибернетика / М. Б. Игнатъев. – Санкт-Петербург : Страта, 2016. – 248 с.
14. *Wooldridge, M.* An Introduction to MultiAgent Systems. Second Edition / M. Wooldridge. – John Wiley & Sons, 2009. – 484 p.
15. *Месарович, М.* Теория иерархических многоуровневых систем / М. Месарович, Д. Мако, И. Такахаара. – Москва : Мир, 1973. – 343 с.
16. *Горошко, И. В.* Согласование социальных и экономических показателей развития региона: понятие и механизмы / И. В. Горошко, Ю. В. Бондаренко // Проблемы управления. – 2015. – № 1. – С. 63–72.
17. *Маслобоев, А. В.* Мультиагентная технология информационной поддержки сетецентрического управления региональной безопасностью / А. В. Маслобоев // Информационно-технологический вестник. – 2018. – № 2 (16). – С. 92–102.
18. *Маслобоев, А. В.* Система поддержки принятия решений в условиях региональных кризисных ситуаций / А. В. Маслобоев // Информационные ресурсы России. – 2017. – № 4 (158). – С. 25–32.
19. *Simon, H. A.* The new science of management decision / H. A. Simon. – Prentice-Hall, 1977. – 175 p.
20. *Маслобоев, А. В.* Применение метода системной динамики при разработке мультиагентных систем поддержки принятия решений / А. В. Маслобоев // Информационные системы и технологии. – 2019. – № 1 (111). – С. 37–45.
21. *Форрестер, Дж.* Мировая динамика / Дж. Форрестер. – Москва : Наука, 1978. – 165 с.
22. *Попков, Ю. С.* Математическая демоэкономика: макросистемный подход / Ю. С. Попков. – Москва : Лананд, 2013. – 560 с.
23. *Путилов, В. А.* Комплекс имитационных моделей поддержки управления региональной безопасностью / В. А. Путилов, А. В. Маслобоев, В. В. Быстров // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 3 (23). – С. 143–158.
24. *Фридман, А. Я.* Ситуационное управление структурой промышленно-природных систем. Методы и модели / А. Я. Фридман. – Saarbrücken, Germany : LAP, 2015. – 530 с.

25. Endsley, M. R. Final Reflections: Situation Awareness Models and Measures / M. R. Endsley // Journal of Cognitive Engineering and Decision Making. – 2015. – Vol. 9, № 1. – P. 101–111.

References

1. Smirnov A. I. *Sovremennye informatsionnye tekhnologii v mezhdunarodnykh otnosheniyakh* [Modern information technologies in international relations]. Moscow: MGIMO-Universitet, 2017, 334 p. [In Russian]
2. Emel'yanov S. V., Oleynik A. G., Popkov Yu. S., Putilov V. A. *Informatsionnye tekhnologii regional'nogo upravleniya* [Information technologies of regional management]. Moscow: Editorial URSS, 2004, 400 p. [In Russian]
3. Tsygichko V. N., Chereshkin D. S., Smolyan G. L. *Bezopasnost' kritichestkikh infrastruktur* [Critical infrastructure security]. Moscow: URSS, 2019, 200 p. [In Russian]
4. Severtsev N. A., Betskov A. V. *Sistemnyy analiz teorii bezopasnosti* [A systematic analysis of the theory of security]. Moscow: MGU «TEIS», 2009, 457 p. [In Russian]
5. Shul'ts V. L., Kul'ba V. V., Shelkov A. B., Chernov I. V. *Stsenarnyy analiza v upravlenii geopoliticheskim informatsionnym protivoborstvom* [Scenario analysis in the management of geopolitical information warfare]. Moscow: Nauka, 2015, 542 p. [In Russian]
6. Novikov D. A. *Teoriya upravleniya organizatsionnymi sistemami* [Theory of management of organizational systems]. 3rd ed., corr. and suppl. Moscow: Fizmatlit, 2012, 604 p. [In Russian]
7. Masloboev A. V., Putilov V. A. *Informatsionnoe izmerenie regional'noy bezopasnosti v Arktike* [Information dimension of regional security in the Arctic]. Apatity: KNTs RAN, 2016, 222 p. [In Russian]
8. Burkov V. N., Gratsianskiy E. V., Dzyubko S. I., Shchepkin A. V. *Modeli i metody upravleniya bezopasnost'yu* [Safety management models and methods]. Moscow: Sinteg, 2001, 139 p. [In Russian]
9. Ryabinin I. A. *Nadezhnost' i bezopasnost' slozhnykh sistem* [Reliability and security of complex systems]. Saint-Petersburg: Politekhnik, 2000, 248 p. [In Russian]
10. Yurkov N. K. *Vestnik Penzenskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Penza state University]. 2013, no. 1, pp. 128–134. [In Russian]
11. Malinetskiy G. G. *Upravlenie riskom. Risk, ustoychivoe razvitie, sinergetika* [Risk management. Risk, sustainable development, synergy]. Moscow: Nauka, 2000, 432 p. [In Russian]
12. Popov N. S., Luzgacheva N. V., Khayri A. *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet im. V. I. Vernad'skogo* [Issues of modern science and practice. University them. V. I. Vernadsky]. 2010, no. 10-12 (31), pp. 10–28. [In Russian]
13. Ignat'ev M. B. *Prosto kibernetika* [Just Cybernetics]. Saint-Petersburg: Strata, 2016, 248 p. [In Russian]
14. Wooldridge M. *An Introduction to MultiAgent Systems. Second Edition*. John Wiley & Sons, 2009, 484 p.
15. Mesarovich M., Mako D., Takahara I. *Teoriya ierarhicheskikh mnogourovnevnykh sistem* [Theory of hierarchical multilevel systems]. Moscow: Mir, 1973, 343 p. [In Russian]
16. Goroshko I. V., Bondarenko Yu. V. *Problemy upravleniya* [Management problem]. 2015, no. 1, pp. 63–72. [In Russian]
17. Masloboev A. V. *Informatsionno-tekhnologicheskiiy vestnik* [Information technology bulletin]. 2018, no. 2 (16), pp. 92–102. [In Russian]
18. Masloboev A. V. *Informatsionnye resursy Rossii* [Information resources of Russia]. 2017, no. 4 (158), pp. 25–32. [In Russian]
19. Simon H. A. *The new science of management decision*. Prentice-Hall, 1977, 175 p.
20. Masloboev A. V. *Informatsionnye sistemy i tekhnologii* [Information systems and technologies]. 2019, no. 1 (111), pp. 37–45. [In Russian]
21. Forrester Dzh. *Mirovaya dinamika* [World dynamics]. Moscow: Nauka, 1978, 165 p. [In Russian]
22. Popkov Yu. S. *Matematicheskaya demoekonomika: makrosistemnyy podkhod* [Mathematical demoeconomic: macrosystem approach]. Moscow: Lenand, 2013, 560 p. [In Russian]
23. Putilov V. A., Masloboev A. V., Bystrov V. V. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem* [Reliability and quality of complex systems]. 2018, no. 3 (23), pp. 143–158. [In Russian]
24. Fridman A. Ya. *Situatsionnoe upravlenie strukturoy promyshlenno-prirodnykh sistem. Metody i modeli* [Situational management of the structure of industrial and natural systems. Methods and models]. Saarbrucken, Germany: LAP, 2015, 530 p. [In Russian]
25. Endsley M. R. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*. 2015, vol. 9, no. 1, pp. 101–111.

Маслобоев Андрей Владимирович

доктор технических наук, доцент,
ведущий научный сотрудник,
Институт информатики и математического
моделирования технологических процессов
Кольского научного центра РАН
(184209, Россия, Мурманская область, г. Апатиты,
ул. Ферсмана, 24А)
Email: masloboev@iimm.ru

Masloboev Andrey Vladimirovich

doctor of technical sciences, associate professor,
leading researcher,
Institute of Informatics and mathematical
modelling of technological processes
of the Kola Science Centre RAS
(184209, 24A Fersmana street, Apatite,
Murmansk region, Russia)

Образец цитирования:

Маслобоев, А. В. Модель и технология поддержки принятия решений в условиях сетевидного управления региональной безопасностью / А. В. Маслобоев // Надежность и качество сложных систем. – 2019. – № 2 (26). – С. 43–59. – DOI 10.21685/2307-4205-2019-2-6.

ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

DIAGNOSTIC METHODS OF ENSURING THE RELIABILITY AND THE QUALITY OF COMPLEX SYSTEMS

УДК 620.1.05

DOI 10.21685/2307-4205-2019-2-7

А. В. Лысенко, Г. В. Таньков, В. С. Калашников, Н. В. Горячев, И. И. Кочегаров

АЛГОРИТМ РЕАЛИЗАЦИИ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ ВИБРАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ БОРТОВОЙ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ¹

A. V. Lysenko, G. V. Tankov, V. S. Kalashnikov, N. V. Goryachev, I. I. Kochegarov

THE ALGORITHM OF REALIZATION OF ADAPTIVE SYSTEM VIBRATION TESTING OF THE ONBOARD AVIONICS

Аннотация. *Актуальность и цели.* При проектировании и создании новых оригинальных устройств бортовой радиоэлектронной аппаратуры очень важная роль отводится выявлению слабых мест конструкции. Избыточные по нагрузке стандартные вибростенды не всегда позволяют достичь требуемого виброускорения в заданной точке конструктива. Целью работы является разработка алгоритма адаптивной системы вибрационных испытаний бортовой радиоэлектронной аппаратуры. *Материалы и методы.* Опираясь на результаты предварительных исследований, определено, что вибрации передаются на устройства через точки крепления, причем не только синфазно, но и в противофазе. При этом в устройстве возникают резонансы колебаний на частотах, совершенно отличающихся от частот, возникающих при испытаниях на

Annotation. *Background.* In the design and creation of new original devices onboard electronic equipment is very important to identify weaknesses design. Excessive load standard vibration stands do not always allow to achieve the required acceleration at a given point of the structure. The aim of the work is to develop an algorithm for adaptive system of vibration tests of onboard electronic equipment. *Materials and methods.* Based on the results of preliminary studies, it is determined that vibrations are transmitted to the device through the attachment points. Moreover, not only in phase, but also in antiphase. At the same time, resonances of oscillations occur in the device at frequencies completely different from the frequencies that arise during tests on standard vibration units. The position of the maxima of the oscillations and the amplitude of the accelerations of adaptive congestion

¹ Статья подготовлена в рамках реализации проекта «Адаптивная интеллектуальная система вибрационных испытаний бортовой радиоэлектронной аппаратуры ракетно-космической и авиационной техники нового поколения на основе многофункциональной цифровой генерации испытательных сигналов» (Соглашение № 17-79-10281 от 24.07.2017) при финансовой поддержке Российского научного фонда.

стандартных виброустановках. Положение максимумов колебаний и амплитуда ускорений перегрузок адаптивно управляются. *Результаты.* Представлена структурная схема установки вибрационных испытаний и алгоритм адаптивного управления процессом испытаний. *Выводы.* Результаты работы позволяют проводить исследование всех требуемых точек платы при максимальном вибрационном воздействии в этой точке и щадящем для других; проводить исследование на всех возможных резонансных частотах в заданном диапазоне; использование специализированной адаптивной системы, ее методик и описанного алгоритма позволяет выявить особенности работы конструкций радиоэлектронных средств с навесными элементами в критических режимах от действия внешних нагрузок и определить динамические характеристики этих конструктивов; использование этих данных дает возможность на этапе проектирования целенаправленно разрабатывать конструктивы радиоэлектронных средств виброустойчивые и вибропрочные при работе изделия в нестационарных условиях эксплуатации.

Ключевые слова: адаптивная система, алгоритм, вибрационные испытания, бортовая радиоэлектронная аппаратура, резонанс.

controlled. *Results.* The block diagram of the vibration test installation and the algorithm of adaptive control of the test process are presented. *Summary.* The results of the work allow us to study all the required points of the Board at the maximum vibration impact at this point and sparing for others; to conduct research on all possible resonant frequencies in a given range; the use of a specialized adaptive system, its techniques and the described algorithm allows us to identify the features of the structures of radioelectronic means with hinged elements in critical modes from the action of external loads and to determine the dynamic characteristics of these structures; the use of these data makes it possible at the design stage to purposefully develop radio-electronic constructs vibration-resistant and vibration-resistant during operation of the product in non-stationary operating conditions

Keywords: adaptive system, algorithm, vibration tests, avionics, resonance.

Введение

В процессе проектирования и создания новых устройств бортовой радиоэлектронной аппаратуры очень важная роль отводится выявлению слабых мест конструкции, которые могут привести к отказам при эксплуатации [1, 2].

Производители испытательного и тестирующего оборудования предлагают при испытаниях использовать вибрационные нагрузки, значительно превышающие уровни нормальных условий эксплуатации. При этом возрастают требования к испытательному оборудованию по мощности, габаритам и значительно растет его стоимость [3].

Разработчики испытательного оборудования обосновывают приобретение более мощных установок разработанными ими технологиями ускоренных испытаний:

HALT (Highly Accelerated Life Test – ускоренные ресурсные испытания);

HASS (Highly Accelerated Stress Screen – ускоренный выборочный контроль).

При этом изделие размещают на вибростоле и производят вибротестирование в направлении каждой из осей координат.

Разработчики тестируемой аппаратуры вынуждены идти на такие испытания и на закупку дорогостоящего, громоздкого испытательного оборудования для того, чтобы ускоренно выявлять дефекты и повышать надежность разрабатываемых устройств [4–6].

Но хотя такие избыточные по нагрузке испытания и проводятся, но отказы радиоаппаратуры остаются. Как показывает анализ результатов эксплуатационных отказов, большинство из них возникают из-за механических, в основном вибрационных воздействий, даже с меньшей амплитудой нагрузки, чем при испытаниях [7, 8].

Структурная схема специализированной адаптивной системы вибрационных испытаний

Авторами разработана специализированная адаптивная система вибрационных испытаний.

Использование специализированной адаптивной системы вибрационных испытаний на этапе проектирования РЭС военного назначения позволяет оценить условия работы конструкции и ее элементов (например, печатных плат с электрорадиоэлементами) в условиях нестационарных внешних воздействий (вибрации, удары, тепловые нагрузки). Применение адаптивной системы позволяет

спроектировать оптимальный вариант изделия, отвечающий требованиям виброустойчивости, вибропрозрачности и теплостойкости при работе в критических режимах эксплуатации, что в целом повышает надежность конечных изделий.

В ходе проектирования и изготовления нового электронного изделия адаптивная система вибрационных испытаний и ее методики используются прежде всего для ускоренного определения динамических характеристик конструктивов РЭС (платы, стержни), когда конструкция еще в чертежах. Для плат это прежде всего – поле перемещений, поле напряжений и поле перегрузок при ее изгибных колебаниях в критическом режиме (резонанс).

Методика проведения испытаний для определения динамических характеристик конструктивных элементов электронных средств описана в работе [9] и позволяет повысить эффективность проведения цикла предварительных испытаний по определению динамических характеристик конструкции.

Сначала методами компьютерного моделирования (с использованием специализированных пакетов программ) определяются резонансные частоты объекта исследования. Затем на каждой резонансной частоте с помощью лазерного датчика измеряется виброускорение в центре пучности собственной формы при нахождении максимальной амплитуды. В центрах пучности измеряются резонансные кривые, из которых в дальнейшем выполняется построение результирующей АЧХ.

Значение характеристик внешних воздействий (амплитуды вибрации, частотный диапазон), действующих на аппаратуру, устанавливаются в соответствии с классификационными группами данных, приведенных в таблицах разделов 5-11 ГОСТ РВ 20.39.304-98, исходя из анализа условий ее функционирования в составе объекта-носителя и значений параметров внешнего воздействия на носителе в условиях его эксплуатации и боевого применения [10].

Для проведения экспериментальных исследований и определения динамических характеристик конструктивов ЭС используется специализированная адаптивная система вибрационных испытаний, которая позволяет задавать на противоположных сторонах пластины колебания, как в фазе, так и со сдвигом фазы на любой угол через соответствующую схему управления. Внешнее воздействие задается в каждую точку крепления от отдельного вибровозбудителя, в качестве которых используются малогабаритные вибровозбудители электродинамического типа TIRAvib S50009. Бесконтактное измерение скорости (ускорения) поверхностных вибраций осуществляется портативным цифровым виброметром PVD 100.

Структурная схема специализированной адаптивной системы вибрационных испытаний представлена на рис. 1.

Специализированная адаптивная система вибрационных испытаний состоит из системы управления, ЭВМ, 4 DDS генераторов, вибрационной системы TIRAvib S50009, состоящей из четырех вибраторов и усилителя мощности, источников питания, электронного регулятора амплитуды многоканального, портативного цифрового виброметра PVD 100, предназначенный для бесконтактного измерения скорости поверхностных вибраций.

Управляющий микроконтроллер предназначен для формирования сигналов управления для DDS генераторов, а также – для связи с ЭВМ по последовательному интерфейсу.

С ЭВМ в управляющий микроконтроллер поступают команды оператора: начальная частота, конечная частота, скорость изменения сигнала (не менее 2 октав в минуту), фазовый сдвиг. DDS генераторы получают от микроконтроллера в виде сигналов TTL уровней следующие команды: старт (начало формирования сигнала), стоп (конец формирования сигнала), форма сигнала (в случае сигнала с плавным изменением частоты это синус), частота (которая будет регулярно меняться), фаза (задается оператором), амплитуда (задается оператором).

Электронный регулятор амплитуды многоканальный предназначен для задания требуемой амплитуды вибрации в точке крепления толкателя вибровозбудителя к объекту исследования (образцу).

Для стабилизации амплитуды виброускорения применяются датчики вибрации в контрольных точках, сигнал которых используется как обратная связь. В данном случае в качестве контрольных точек выбраны элементы крепления исследуемого образца к толкателю вибровозбудителя. Таким образом, необходимая амплитуда виброускорения задается оператором на ЭВМ и через управляющий микроконтроллер транслируется регулятору амплитуды по интерфейсу I2C. А поддерживается требуемое виброускорение в точках крепления с помощью цепей обратной связи усилителей мощности, выходной сигнал которых подается на вибровозбудители. Кроме того, обратная связь компенсирует неравномерность частотных характеристик вибровозбудителей.

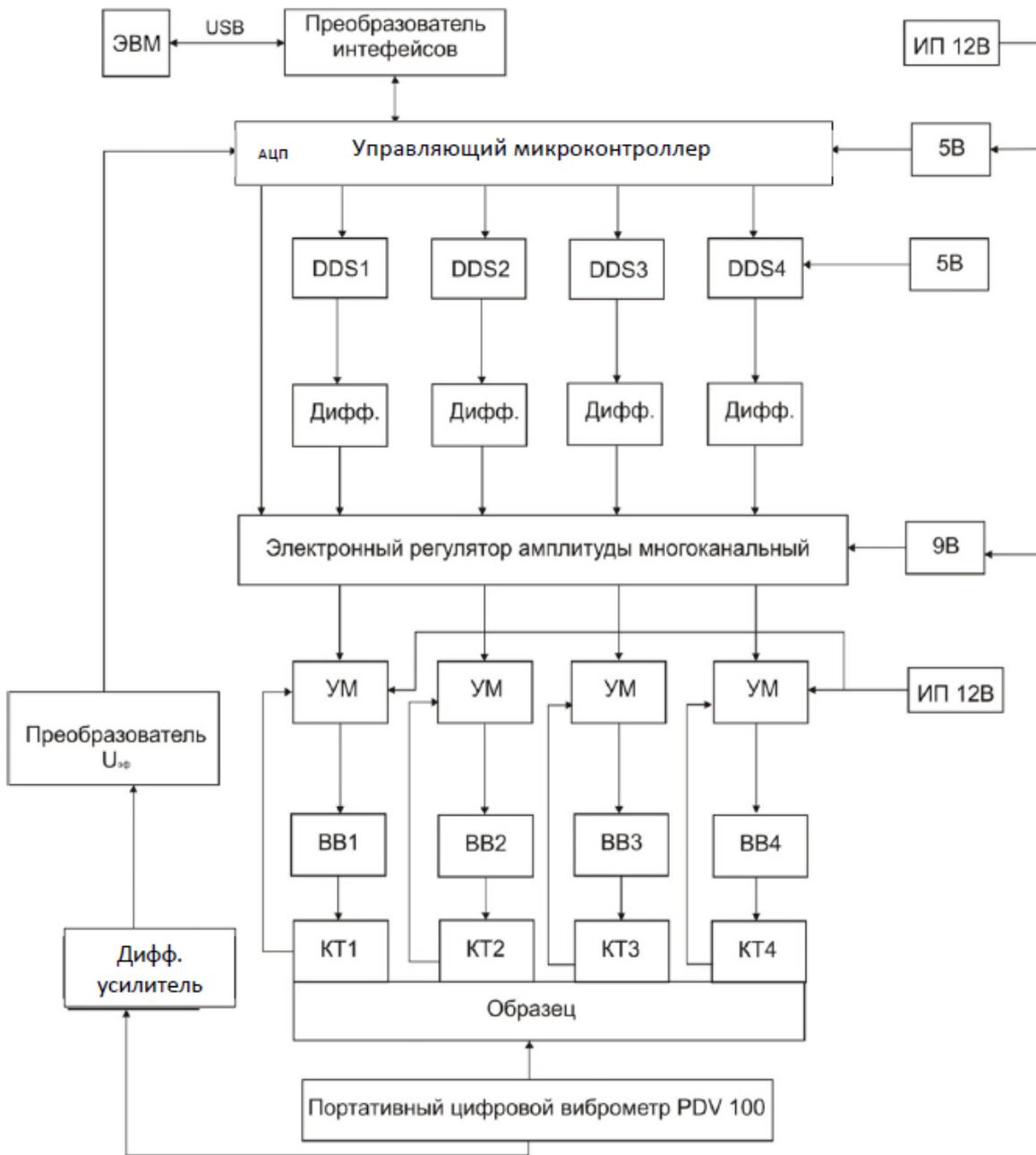


Рис. 1. Структурная схема специализированной адаптивной системы вибрационных испытаний:
 DDS – управляемые цифровые генераторы, Дифф. – аналоговые дифференциаторы,
 УМ – усилители мощности, ВВ – вибровозбудители, КТ – датчики вибрации в контрольных точках

Для вибрационного возбуждения объекта исследования используются малогабаритные вибровозбудители электродинамического типа TIRA vib S50009. Количество вибровозбудителей соответствует количеству точек крепления. В большинстве случаев это четыре.

Вибрационные колебания, формируемые на толкателях электродинамических преобразователей, пропорциональны производной электрического сигнала, т.е. виброскорости. Так как для проведения испытаний на определение резонансных частот необходимо виброускорение, сигнал с выхода DDS генераторов подается на аналоговый дифференциатор, выход которого соединен с регулятором амплитуды. Портативный цифровой виброметр позволяет достичь в частотном диапазоне от 0,05 Гц до 22 кГц такой точности измерений, для которой раньше требовалось стационарное измерительное устройство в калибровочной лаборатории. Виброметр имеет три диапазона измерений, охватывающие интервал скоростей от 0,05 мкм/с до 0,5 м/с, и оснащен точными цифровыми фильтрами.

Внешний вид и устройство измерительной системы приведены на рис. 2.



Рис. 2. Внешний вид и устройство измерительной системы

На этой установке снятие АЧХ платы проводится при синфазном и противофазном возбуждении точек крепления платы [11].

Использование установки позволяет экспериментально получить полную информацию о собственных формах и частотах при колебаниях платы в резонансных режимах.

Получение этой информации позволяет уже на этапе проектирования разрабатывать методы и способы защиты конструкций от дестабилизирующего влияния механических факторов. При правильном применении этих исследований возможно не только сократить цикл разработки изделий, но и получить надежное и законченное проектное решение.

Методики специализированной адаптивной системы вибрационных испытаний позволяют найти путь подавления амплитуды прогиба четных и нечетных гармоник при резонансных колебаниях несущей пластины печатного узла: при уменьшении амплитуды внешнего воздействия второго края пластины и синфазном возбуждении точек крепления уменьшается амплитуда прогиба нечетной гармоники; при противофазном возбуждении – уменьшается прогиб четной гармоники [12]. Инженерное решение этой задачи (например, исследование для наиболее ответственных узлов активных амортизаторов) повышает надежность конструктива.

Использование измерительной установки специализированной адаптивной системы вибрационных испытаний позволяет экспериментально получить формы колебаний пластины, и они соответствуют нормальным модам колебаний пластины, полученных расчетным путем, только в математических формах [13] узловые линии располагаются по краям пластины. Но в целом эти экспериментальные данные можно использовать при решении задачи размещения радиоэлементов на плате на этапе проектирования изделия.

Помимо этого, на этой установке, меняя фазу колебаний в одной или нескольких задающих точках, можно получить гармоническое движение в форме бегущей волны или подобрать фазу, когда пучность волны (т.е. максимальная амплитуда прогиба) смещается к какому-либо краю пластины, а основная площадь пластины остается нейтральной и пригодной для размещения радиоэлементов, так как коэффициент эксплуатационной жесткости почти для всех ЭРЭ печатного узла будет близок к единице. Такое решение позволит получить высокую степень вибропрочности и виброустойчивости конструктива ЭС и повысить надежность всего изделия в целом.

Методики специализированной адаптивной системы вибрационных испытаний позволяют исследовать и внедрять конструкции РЭС, у которых собственные частоты колебаний выведены за пределы диапазона частот возмущающих воздействий, что исключает появление изгибных колебаний печатных узлов, являющихся основной причиной усталостного разрушения выводов ЭРЭ и паяных соединений [14].

Такие печатные узлы, условно называемые «безрезонансными», не имея в процессе эксплуатации изгибных колебаний в диапазоне частот возмущающих воздействий, в плане надежности соответствуют стационарной аппаратуре. А это значит, что коэффициент эксплуатационной жесткости

при прочих равных условиях равняется единице для всех ЭРЭ печатных узлов. В результате использование в РЭС безрезонансных печатных узлов позволяет уменьшить интенсивность их отказов в несколько раз. При этом массогабаритные характеристики блоков РЭС без изоляции оказываются не хуже, чем с виброизоляцией [15].

Алгоритм работы специализированной адаптивной системы вибрационных испытаний

На рис. 3 представлен алгоритм работы специализированной адаптивной системы вибрационных испытаний.

Описание алгоритма:

1. После принятия решения о начале вибрационных испытаний с помощью адаптивной системы на основе технического задания (ТЗ) и исходных данных:
2. Выбираем (или используем заданный) конструктив разрабатываемого изделия.
3. Для конструктива по п. 2 определяем (задаем) точки контроля N .
- 4,а. Изготавливаем опытный(е) образец(ы).
- 5,а. Производим контроль внешнего вида и параметров образцов.
- 6,а. Закрепляем на вибростенде и определяем резонансные частоты опытного изделия в заданном диапазоне вибрационных частот эксплуатации (ТЗ) f_{Mi} .
- 4,б. Ввод в моделирующую программу исходных данных:
 - размеры и материал платы;
 - способ крепления;
 - установленные элементы (тип, место установки, способ установки).
- 5,б. Определяем (задаем) точность модели ϵ .
- 6,б. Производим расчет резонансных частот на используемой математической модели f_{Pi} .
7. Сравниваем значения резонансных частот расчетной модели f_{Mi} со значениями частот реальной испытываемой модели f_{Pi} .
8. На основании сравнения значений резонансных частот f_{Mi} и f_{Pi} принимается решение об адекватности математической модели с заданной точностью.
9. Либо производим корректировку модели с помощью поправочных коэффициентов.
10. Выбираем точку наблюдения n .
11. Направляем луч лазерного виброметра в выбранную точку.
12. Используя адекватную модель, производим расчет частот стоячих и бегущих волн при синфазном, противофазном и при произвольном задании фаз задающих воздействий в точках крепления платы.
13. Используя результаты моделирования, устанавливаем (для заданной точки) режим вибрационного воздействия:
 - f_i – частота резонанса;
 - φ_{ik} – фаза k -го вибратора, задающего колебания вибратора в точке крепления платы.
14. Задание A_{ik} амплитуд задающих колебаний k -го вибратора в точке крепления.
15. С помощью пятиточечного сканирования лазерным виброметром в окрестностях выбранной точки проверяем.
16. И в случае необходимости корректируем положение максимума колебаний платы, пропорционально изменяем A_{ik} так, чтобы в заданной точке на исследуемой резонансной частоте находился экстремум колебаний платы с заданной амплитудой (ускорением).
17. Проверяем, весь ли заданный в ТЗ частотный диапазон проверен, если нет – п.18.
18. Переход к следующей частоте f_i и повторение пунктов алгоритма пп. 13–17.
19. Проверяем все контрольные точки проконтролированы, если нет – п. 20
20. Переход к следующей заданной точке п. 10 и повторяем пп. 10–18.
21. Производим контроль внешнего вида и параметров образцов.
22. Проверяем, есть ли дефекты, отказы, если есть – п. 23.
23. Производим анализ изделия на дефекты или отказы. Если отказы или дефекты есть – принимаем решение о переходе п. 2, где на основании полученных данных принимается решение:
 - об изменении способа крепления,
 - об изменении размещения элементов,
 - об необходимом изменении конструктива.

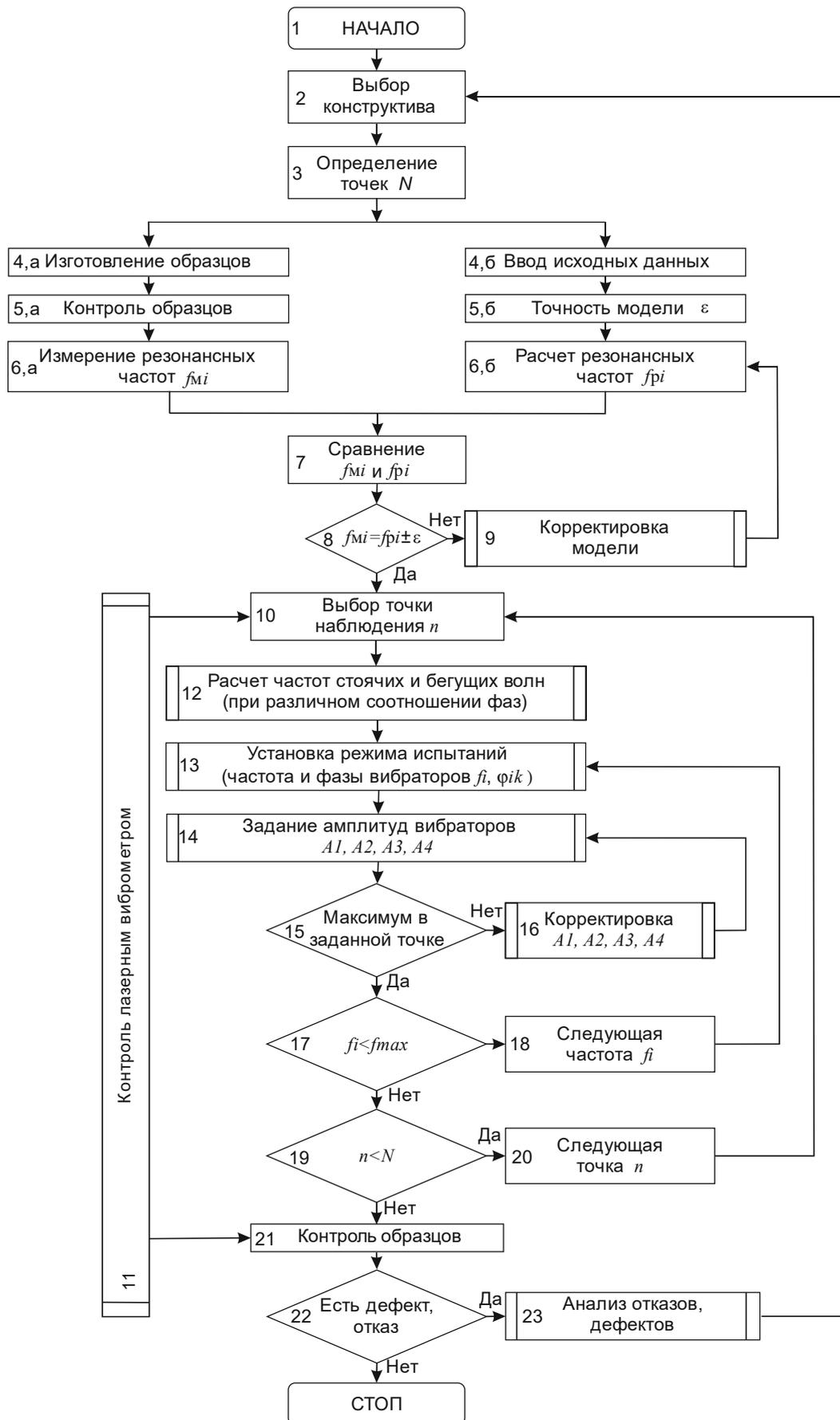


Рис. 3. Алгоритм работы специализированной адаптивной системы вибрационных испытаний

Заключение

С помощью представленного алгоритма и адаптивной системы вибрационных испытаний мы получаем:

- 1) исследование всех требуемых точек платы при максимальном вибрационном воздействии в этой точке и шадящем для других;
- 2) исследование на всех возможных резонансных частотах в заданном ТЗ диапазоне;
- 3) использование специализированной адаптивной системы, ее методик и описанного алгоритма позволяет выявить особенности работы конструкций РЭС с навесными элементами в критических режимах от действия внешних нагрузок и определить динамические характеристики этих конструктивов;
- 4) использование этих данных дает возможность на этапе проектирования целенаправленно разрабатывать конструктивы РЭС виброустойчивые и вибропрочные при работе изделия в нестационарных условиях эксплуатации.

Библиографический список

1. Особенности разработки макромоделей надежности сложных электронных систем / Н. К. Юрков, А. В. Затылкин, С. Н. Полесский, И. А. Иванов, А. В. Лысенко // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2014. – Т. 1. – С. 101–102.
2. Гришко, А. К. Многокритериальный выбор оптимального варианта сложной технической системы на основе интервального анализа слабоструктурированной информации / А. К. Гришко, И. И. Кочегаров, А. В. Лысенко // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 3 (21). – С. 97–107.
3. Lysenko, A. V. Optimizing structure of complex technical system by heterogeneous vector criterion in interval form / A. V. Lysenko, I. I. Kochegarov, N. K. Yurkov, A. K. Grishko // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1015, iss. 4. – DOI 10.1088/1742-6596/1015/4/042032.
4. Лысенко, А. В. Методика моделирования внешних механических воздействий на бортовую РЭА / А. В. Лысенко, Е. А. Данилова, Г. В. Таньков // Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий. – 2013. – Т. 1. – С. 226–228.
5. Влаagoзащитное покрытие печатных узлов в датчике утечки воды / А. Г. Белов, В. Я. Баннов, В. А. Трусов, И. И. Кочегаров, А. В. Лысенко, Н. К. Юрков // Современные информационные технологии. – 2014. – № 19. – С. 265–272.
6. Функциональная модель информационной технологии обеспечения надежности сложных электронных систем с учетом внешних воздействий / Н. К. Юрков, А. В. Затылкин, С. Н. Полесский, И. А. Иванов, А. В. Лысенко // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2014. – Т. 1. – С. 184–187.
7. Автоматизированная многоканальная виброиспытательная установка / А. В. Лысенко, А. В. Затылкин, Д. А. Голушко, Д. А. Рындин, Н. К. Юрков // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2012. – № 5. – С. 83.
8. Лысенко, А. В. Анализ особенностей применения современных активных систем виброзащиты для нестационарных РЭС / А. В. Лысенко, Г. В. Таньков, Д. А. Рындин // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2013. – Т. 2. – С. 155–158.
9. Методика проведения испытаний для определения динамических характеристик БРЭА / А. В. Лысенко, Г. В. Таньков, В. А. Трусов, И. И. Кочегаров // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2018. – Т. 2. – С. 106–108.
10. ГОСТ РВ 20.39.304-98 Комплексная система общих технических требований. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Требования стойкости к внешним воздействующим факторам. – Москва : Госстандарт России, 1999. – 55 с.
11. Голушко, Д. А. О скорости изменения частоты при проведении испытаний для определения динамических характеристик конструкции / Д. А. Голушко, А. В. Затылкин, А. В. Лысенко // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2015. – № 4 (26). – С. 147–154.
12. Лысенко, А. В. Методика моделирования влияния внешних механических воздействий на динамические параметры РЭА в среде MATHCAD / А. В. Лысенко // Современные наукоемкие технологии. – 2014. – № 5-1. – С. 68–69.
13. Морз, Ф. Колебания и звук : пер. с англ. / Ф. Морз ; под ред. С. Н. Ржевкина. – Москва ; Ленинград : Изд-во техн.-теор. лит., 1949. – 497 с.
14. Yurkov, N. K. On the problem of experimental research of forced vibrations of plates / N. K. Yurkov, G. V. Tankov, A. V. Lysenko, V. A. Trusov // Proceedings of the 19th International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM. – 2016. – P. 416–418. – DOI 10.1109/SCM.2016.7519798.
15. Лысенко, А. В. Способ снижения величины вибрационных нагрузок в несущих конструкциях ЭС и методика его реализующая / А. В. Лысенко // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 4. – С. 41–44.

References

1. Yurkov N. K., Zatytkin A. V., Poleskiy S. N., Ivanov I. A., Lysenko A. V. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and quality]. 2014, vol. 1, pp. 101–102. [In Russian]
2. Grishko A. K., Kochegarov I. I., Lysenko A. V. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2017, no. 3 (21), pp. 97–107. [In Russian]
3. Lysenko A. V., Kochegarov I. I., Yurkov N. K., Grishko A. K. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018, vol. 1015, iss. 4. DOI 10.1088/1742-6596/1015/4/042032.
4. Lysenko A. V., Danilova E. A., Tan'kov G. V. *Innovatsii na osnove informatsionnykh i kommunikatsionnykh tekhnologiy* [Innovation through information and communication technologies]. 2013, vol. 1, pp. 226–228. [In Russian]
5. Belov A. G., Bannov V. Ya., Trusov V. A., Kochegarov I. I., Lysenko A. V., Yurkov N. K. *Sovremennye informatsionnye tekhnologii* [Modern information technology]. 2014, no. 19, pp. 265–272. [In Russian]
6. Yurkov N. K., Zatytkin A. V., Poleskiy S. N., Ivanov I. A., Lysenko A. V. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and quality]. 2014, vol. 1, pp. 184–187. [In Russian]
7. Lysenko A. V., Zatytkin A. V., Golushko D. A., Ryndin D. A., Yurkov N. K. *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus* [XXI century: results of the past and problems of the present plus]. 2012, no. 5, p. 83. [In Russian]
8. Lysenko A. V., Tan'kov G. V., Ryndin D. A. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and quality]. 2013, vol. 2, pp. 155–158. [In Russian]
9. Lysenko A. V., Tan'kov G. V., Trusov V. A., Kochegarov I. I. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and quality]. 2018, vol. 2, pp. 106–108. [In Russian]
10. *GOST RV 20.39.304-98 Kompleksnaya sistema obshchikh tekhnicheskikh trebovaniy. Apparatura, pribory, ustroystva i oborudovanie voennogo naznacheniya. Trebovaniya stoykosti k vneshnim vozdeystvuyushchim faktoram* [GOST RV 20.39.304-98 Complex system of General technical requirements. Equipment, instruments, devices and equipment for military purposes. Requirements for resistance to external factors]. Moscow: Goststandart Rossii, 1999, 55 p. [In Russian]
11. Golushko D. A., Zatytkin A. V., Lysenko A. V. *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus* [XXI century: results of the past and problems of the present plus]. 2015, no. 4 (26), pp. 147–154. [In Russian]
12. Lysenko A. V. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii* [Modern science-intensive technologies]. 2014, no. 5-1, pp. 68–69. [In Russian]
13. Morz F. *Kolebaniya i zvuk: per. s angl.* [Vibrations and sound : translation from English]. Moscow; Leningrad: Izd-vo tekhn.-teor. literatury, 1949, 497 p. [In Russian]
14. Yurkov N. K., Tankov G. V., Lysenko A. V., Trusov V. A. *Proceedings of the 19th International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM*. 2016, pp. 416–418. DOI 10.1109/SCM.2016.7519798.
15. Lysenko A. V. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2013, no. 4, pp. 41–44. [In Russian]

Лысенко Алексей Владимирович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: lysenko_av@bk.ru

Таньков Георгий Васильевич

кандидат технических наук, доцент,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: kipra@pnzgu.ru

Lysenko Alexey Vladimirovich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of radio equipment design
and production,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Tankov Georgiy Vasilievich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of radio equipment design
and production,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Калашников Владимир Сергеевич

преподаватель,
кафедра эксплуатации радиоэлектронного
оборудования,
Военный институт Сил воздушной обороны
Республики Казахстан им. Т. Я. Бегельдинова
(Казахстан, г. Актобе, пр. А. Молдагуловой, 16),
E-mail: kalashnikov_vs@mail.ru

Горячев Николай Владимирович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: ra4foc@yandex.ru

Кочегаров Игорь Иванович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: kipra@mail.ru

Kalashnikov Vladimir Sergeevich

lecturer,
sub-department of operation electronic equipment,
Military Institute of air defence Forces of the Republic
of Kazakhstan named T. Y. Begeldinov
(16 A. Moldagulova pr., Aktobe, Kazakhstan)

Goryachev Nikolay Vladimirovich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of radio equipment design
and production,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Kochegarov Igor Ivanovich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of radio equipment design
and production,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Алгоритм реализации адаптивной системы вибрационных испытаний бортовой радиоэлектронной аппаратуры / А. В. Лысенко, Г. В. Таньков, В. С. Калашников, Н. В. Горячев, И. И. Кочегаров // Надежность и качество сложных систем. – 2019. – № 2 (26). – С. 60–69. – DOI 10.21685/2307-4205-2019-2-7.

М. Ю. Михеев, О. В. Прокофьев, М. В. Тюрин, Д. А. Ярославцева

АНАЛИЗ КОРОТКОГО ВРЕМЕННОГО РЯДА В КАРТЕ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА

M. Y. Mikheev, O. V. Prokof'ev, M. V. Tyurin, D. A. Yaroslavtseva

ANALYSIS OF A SHORT TIME SERIES IN A QUALITY CONTROL CHART

Аннотация. *Актуальность и цели.* Одним из методов реализации системы качества продукции на поточном производстве является анализ контрольных карт. Помимо проверки нахождения контролируемого показателя внутри допустимых границ и поиска периодических колебаний показателя, в процедуру анализа входит выявление и анализ тренда. Целью работы является совершенствование системы качества продукции в поточном производстве. *Материалы и методы.* Применены дополнительные процедуры анализа короткого временного ряда, формируемого при анализе карты контроля качества. Разработан комплексный алгоритм выявления изменений структуры временного ряда. *Результаты.* Показано, что в процедуру анализа входит проверка расположения большинства точек по одну сторону от центральной линии, что означает возникновение аддитивной составляющей тренда. Количество наблюдений, используемых в процессе анализа, составляет от 7 до 100 точек, расположенных на контрольной карте подряд. Авторы предложили ввести дополнения в процедуру анализа короткого временного ряда, формируемого при анализе карты контроля качества. *Выводы.* Показана возможность получения информативных качественных выводов на основе количественного прогноза, полной автоматизации процесса, исключения этапа экспертной оценки, предполагаемого при традиционном использовании оперативного реагирования на события, послужившие причиной изменения структуры временного ряда. Перечисленные процедуры, применённые к контрольным картам, могут быть полезными для принятия стратегических решений в области системы контроля качества изделий, выпускаемых поточным способом.

Ключевые слова: контрольная карта Шухарта, карта контроля качества, структура временного ряда, изменение модели тренда.

Abstract. *Background.* One of the methods for implementing a product quality system in mass production is the analysis of control charts. In addition to checking whether a controlled indicator is within tolerable limits and searching for periodic fluctuations in the indicator, the analysis procedure includes the identification and analysis of the trend. The work objective includes further development of the product quality system in mass production. *Materials and methods.* Supplementary procedures for analyzing a short time series formed when analyzing a quality control map have been applied. Comprehensive algorithm to expose reconfiguration in time series has been developed. *Results.* It has been illustrated that the analysis procedure includes checking the location of most points on one side of the center line, which means the appearance of the additive component of the trend. The number of observations used in the analysis process is from 7 to 100 points located on the control chart in a row. The authors proposed to introduce additions to the procedure for analyzing a short time series formed when analyzing a quality control map. *Conclusions.* The following availabilities have been presented: informative qualitative conclusions based on quantitative forecast, overall process automation, elimination of expert analysis expected under prompt response to the incidents that caused reconfiguration in time series. The abovementioned procedures applied to the quality control map can be particularly useful when making policy decisions relative to quality system of the items in mass production.

Keywords: Shewhart charts, control charts, time series structure, trend model change.

Введение

Организация системы менеджмента качества для поточного производства изделий требует применения инструментов контроля качества, адекватных целям по качеству, технологическим параметрам и спецификациям готового изделия [1]. Одним из семи основных инструментов являются контрольные карты Шухарта [2], представляющие временные ряды статистических характеристик или первичных данных измерений параметров изделия. Если анализ контрольной диаграммы пока-

зывает, что процесс в настоящее время находится под контролем (является стабильным, с вариациями, исходящими только из внешних для процесса источников), то никаких изменений или изменений в параметрах управления процессом не требуется. Используя набор методов анализа, можно обнаружить, что отслеживаемый процесс не находится под контролем и анализ диаграммы может помочь определить источники изменений. Например, технологические нарушения в литейном производстве проявляются в следующих формах [3]: неполная отливка, заливы, наросты, пригар, раковины, рыхлоты, пористость, трещины, коробление, механические повреждения, окисление и пережог, несоответствие размеров и конфигураций отливок заданным (в корпусных изделиях – перекося, разностенность), несоответствие заданным характеристикам химического состава металла. Не все перечисленные дефекты поддаются быстрому выявлению, измерению и экспертной оценке по наружным признакам. Особый вопрос – это дрейф параметров изделий литейного производства по причине своевременного не обнаруженных изменений технологии.

Медленная «деградация» качества возникает вследствие изменения температуры расплава, масла и стенки формы; геометрии сопла; разводящих и впускных каналов под действием подаваемого материала; вязкости масла в результате старения и загрязнения; условий вентиляции формы; давления в нагревательном цилиндре у машин с предпластикацией (в производстве пластмассовых корпусов). Помимо тренда, в параметрах литого изделия проявляется стохастическая составляющая. Быстрые колебания контролируемых параметров могут являться последствием вариации момента переключения и быстроты срабатывания обратного клапана, статистического рассеяния длительности пластикации, скорости впрыска, давления в нагревательном цилиндре у машин с предпластикацией. К перечисленному можно добавить материальный износ подвижных частей механизмов, возникновение сколов, деформации пружин. Такое событие может внести изменения в параметры тренда контролируемой количественной характеристики изделия. Таким образом, формируемый временной ряд может характеризоваться переменной структурой, изменения которой могут протекать достаточно быстро, в течение анализируемого отрезка временного ряда.

Постановка задачи и ее практическая значимость

Процедура построения и анализа контрольной карты связана с формированием дискретизированного временного ряда и проверкой свойств текущего (скользящего) короткого участка этого ряда. Рассмотрим контроль качества продукции на примере среднего значения и размаха веса литейных изделий.

На рис. 1 приведены примеры стабильного и нестабильного состояний производственного процесса.

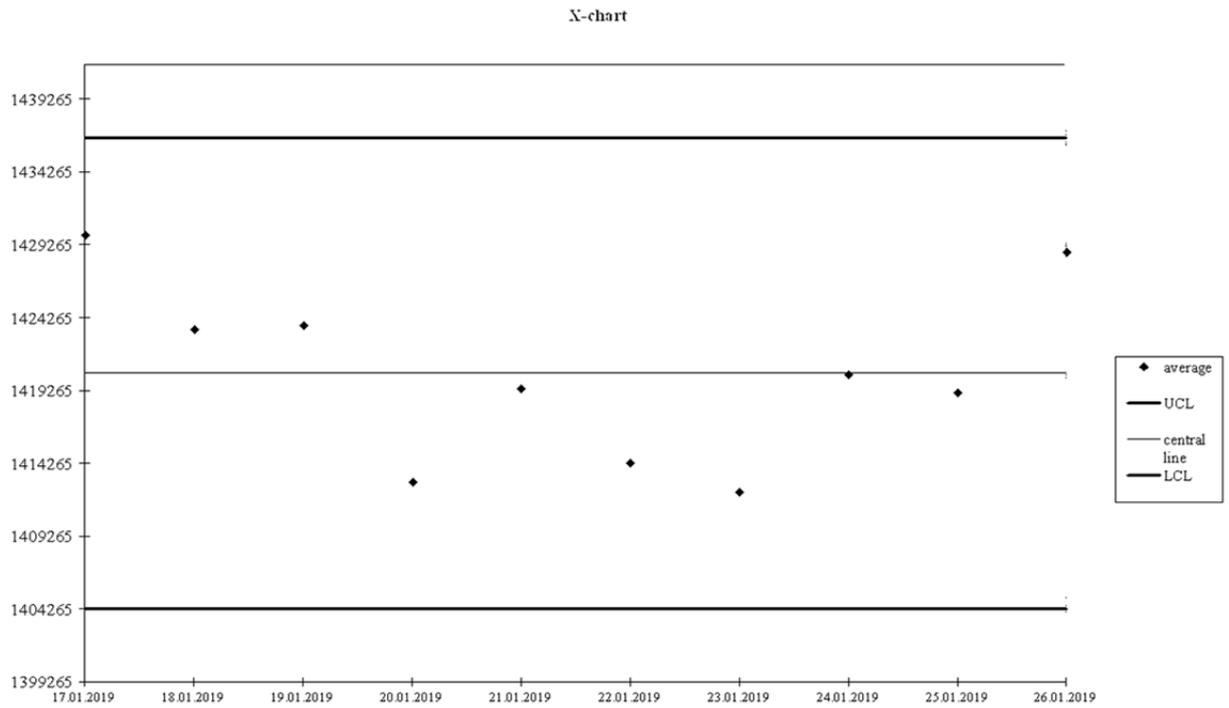
Если на контрольной карте нанесены экспериментальные точки, и все из 25 точек подряд или 34 и более точек из 35 точек подряд, или 98 и более точек из 100 точек подряд лежат внутри границ контрольных линий, то можно считать, что производственный процесс находится в стабильном состоянии.

Если:

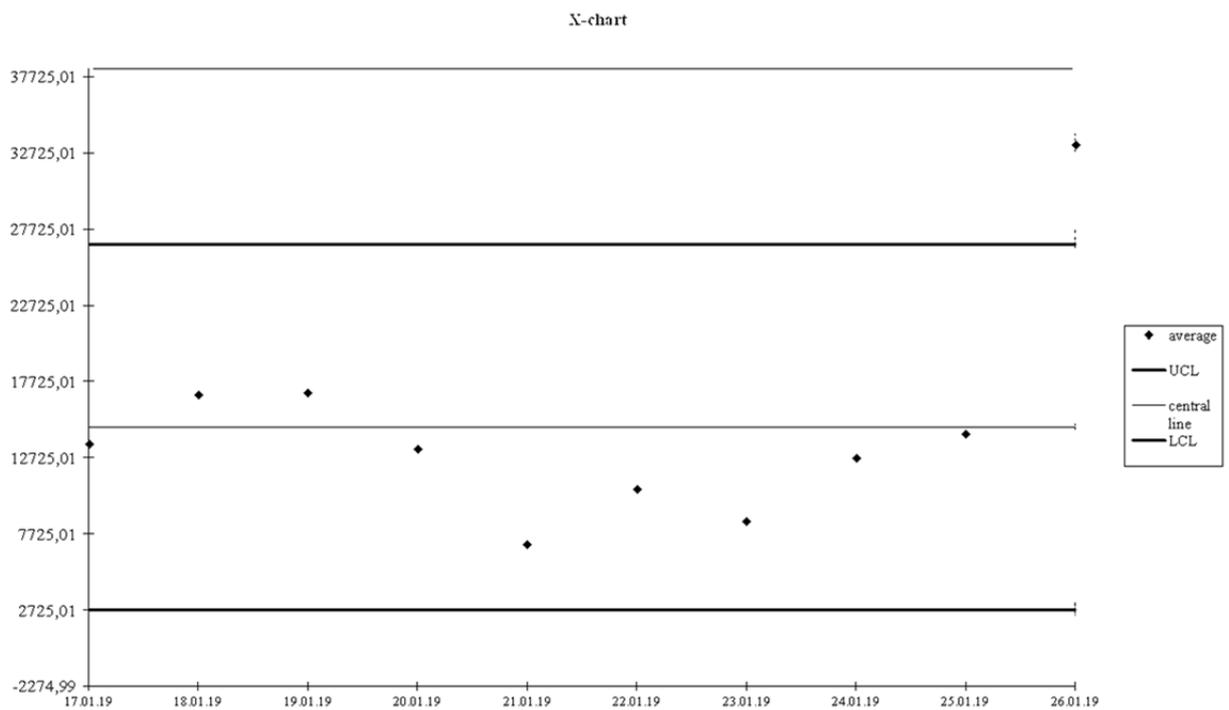
- семь точек подряд, или 10 точек из 11 точек подряд, или 12 точек из 14 точек подряд, или 14 точек из 17 точек подряд, или 16 точек из 20 точек подряд располагаются по одну сторону от центральной линии;
- наблюдается тенденция к смещению точек вверх или вниз;
- точки регулярно колеблются вверх – вниз, то, отыскав причины этого, можно получить важнейшую информацию.

С помощью контрольных карт можно получить ответ на вопрос, находится ли производственный процесс в контролируемом состоянии.

Контрольные карты можно разделить на контрольные карты для количественных характеристик и для качественных признаков. Для предметной области литейного производства более пригодна количественная контрольная карта $\bar{x} - R$, на основе которой осуществляется проверка размера, веса и т.д. Такая карта состоит из контрольной карты \bar{x} , управляющей изменением среднего, и контрольной карты R , управляющей изменением размаха [4]. Для построения контрольной карты $\bar{x} - R$ прежде всего берут данные, собранные за определенный промежуток времени. Эти данные обрабатывают следующим образом. Результаты измерений отдельных изделий объединяют в k групп (k обычно 20 + 25) объемом 4–5 результатов и измеряют их характеристики. Среднее первой группы обозначают \bar{x}_1 , среднее второй группы \bar{x}_2 , среднее группы k \bar{x}_k .



a)



b)

Рис. 1. Состояние производственного процесса: a – стабильное (управляемое, контролируемое); b – нестабильное (неуправляемое, неконтролируемое)

Затем рассчитывают среднее $\bar{\bar{x}}$ этих средних $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_k$. Оно становится центральной линией контрольной карты \bar{x} . Затем для каждой группы определяют размахи R_1, R_2, \dots, R_k на основе данных по каждой группе. Среднее \bar{R} этих R_1, R_2, \dots, R_k выбирается за центральную линию контрольной карты R .

Контрольные пределы параметров изделия описаны согласно табл. 1.

Таблица 1

Контрольные карты и контрольные пределы

Название контрольной карты	Что контролируется	Верхний контрольный предел (UCL)	Нижний контрольный предел (LCL)
Контрольная карта \bar{x}	Среднее	$\bar{\bar{x}} + A_2\bar{R}$	$\bar{\bar{x}} - A_2\bar{R}$
Контрольная карта R	Размах	$D_4\bar{R}$	$D_3\bar{R}$

Здесь A_2, D_3, D_4 – константы, зависящие от объема выборки n (они называются граничными коэффициентами); \bar{p} – процент брака из предыдущих данных; \bar{u}, \bar{c} – также значения из предыдущих данных.

Используя формулы табл. 1, строят контрольные линии. Граничные коэффициенты A_2, D_3, D_4 , используемые в формулах табл. 1, представлены в табл. 2. При $n \leq 6$ нижний контрольный предел контрольной карты R не рассчитывается.

Таблица 2

Граничные коэффициенты

Объем n выборки одной группы	Коэффициент		
	A_2	D_3	D_4
2	1,880	–	3,267
3	1,023	–	2,575
4	0,729	–	2,282
5	0,577	–	2,115
6	0,483	–	2,004
7	0,419	0,076	1,924
8	0,373	0,136	1,864
9	0,337	0,184	1,816
10	0,308	0,223	1,777

Построение допустимых уровней проводится методом «трех сигм». Если случайная величина X имеет нормальное распределение $N(\mu, \sigma^2)$, то

$$P(\mu - 1,96\sigma < X < \mu + 1,96\sigma) = 0,95.$$

Если в правой части уравнения взять 0,99, то получится

$$P(\mu - 2,58\sigma < X < \mu + 2,58\sigma) = 0,99.$$

Округляя коэффициенты перед σ в скобках вместо 1,96–2, а вместо 2,58–3, далее рассуждают так. Отклонения величиной в два стандартных отклонения редки (вероятность менее 0,05), а отклонения величиной в три стандартных отклонения почти не возникают (вероятность менее 0,01).

Вторую половину этого рассуждения можно выразить иначе, а именно: вероятность попадания фактических результатов X в пределы «среднее плюс-минус 3 сигма» превышает 99 %, т.е. вероятность выхода за 3σ меньше 1 %.

Рассмотрим с этой точки зрения контрольную карту $\bar{x} - R$. При выборке объемом n : X_1, X_2, \dots, X_n из нормальной совокупности $N(\mu, \sigma^2)$ распределение выборочного среднего \bar{X} будет тоже нормальным распределением $N(\mu, \sigma^2/n)$. Если даже неизвестно, что генеральное распределение нормально, все равно при большом объеме выборки n можно считать, что распределение

выборочного среднего \bar{X} близко к нормальному распределению. Если распределение совокупности не нормально, но сравнительно близко к нему, то даже при небольшом n (т.е. $n = 4$ или $n = 5$) можно считать, что распределение \bar{X} весьма близко к нормальному распределению $N(\mu, \sigma^2/n)$. Поскольку стандартное отклонение (сигма) распределения \bar{X} равно σ/\sqrt{n} , в данном случае «среднее плюс-минус 3 сигма» имеет вид

$$\mu \mp 3 \frac{\sigma}{\sqrt{n}}.$$

При этом, если известны μ , σ , можно следующим образом определить UCL (верхний контрольный предел) и LCL (нижний контрольный предел):

$$UCL = \mu + 3 \frac{\sigma}{\sqrt{n}}; \quad LCL = \mu - 3 \frac{\sigma}{\sqrt{n}}.$$

Таким образом строятся контрольные пределы на основе метода «3 сигма». При этом необходимо знать генеральное среднее μ и генеральное стандартное отклонение σ . Их оценки рассчитывают по выборочным средним $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_k$ k групп с объемом выборок n :

- оценка математического ожидания $\mu = \bar{\bar{x}}$;
- оценка стандартной ошибки $\sigma = \bar{R}/d_3$,

где d_3 – коэффициент, зависящий только от n .

Используя эти оценки, получаем контрольные пределы

$$\bar{x} = \bar{\bar{x}} \mp \frac{1}{\sqrt{n}} \frac{\bar{R}}{d_3}.$$

Обозначив

$$\frac{3}{\sqrt{nd_3}} = A_2,$$

получаем контрольные пределы

$$UCL = \bar{\bar{x}} + A_2 \bar{R}, \quad LCL = \bar{\bar{x}} - A_2 \bar{R}.$$

Контрольные пределы для R определяются таким же образом на основе метода «3 сигма». При этом, если нижний контрольный предел окажется отрицательным числом, он в расчет не принимается.

Кроме того, прогнозировать возможность выхода за контрольные пределы можно с помощью построения тренда наблюдений, который также упоминается среди перечня составляющих инструментов качества. Но дополнение стандартных процедур проверкой на изменение структуры временного ряда, проведенной по тем же данным, позволит выявить дополнительную информацию о качестве изделий. Появление дополнительного отрицательного аддитивного смещения тренда на карте контроля веса может указывать на систематическое появление пузырей, полостей и раковин в затвердевшей массе. С другой стороны, появление дополнительного положительного аддитивного смещения тренда может указывать не только на устранимые причины отклонений в виде литников и облоя, но и скрытые причины в виде утолщения внутренних перегородок и других неочевидных деформаций корпуса.

Базовая методология

Предложена процедура [5] выявления разрыва тренда короткого временного ряда, позволяющая автоматически определить момент появления нового аддитивного смещения.

Если временной ряд характеризуется преобладанием закономерности над случайной составляющей, то тогда его модель может быть представлена в виде уравнения

$$x_t = a + bZ_t + ct + d(Z_t)t + \varepsilon_t, \quad (1)$$

где x_t – уровень временного ряда, Z_t – фиктивная переменная, которой задают значение 1 до излома тренда и 0 после излома тренда; a, b, c, d – параметры модели; ε_t – остаточный компонент. Если параметр b значим, то произошло существенное изменение постоянной составляющей тренда. Рассмотрим метод определения аддитивного смещения.

Инициализация расчетов происходит по мере формирования каждого очередного цифрового значения уровня временного ряда. Осуществляется регистрация 14 последних значений уровней цифрового ряда. Вычисляется логическое выражение

$$K_A = A \wedge B \wedge C,$$

где A – «истина», если наблюдения 1–7 не аномальны на своем участке ряда, «ложь» – иначе; B – «истина», если наблюдение 8 аномально по отношению к наблюдениям 1–7, «ложь» – иначе; C – «истина», если наблюдения 8–14 не аномальны на своем участке ряда, «ложь» – иначе.

Значение величины K_A «истина» означает выявленное аддитивное смещение линейного тренда.

Понятие «аномальности» определено на основе модифицированного критерия Ирвина [6], когда для каждого уровня временного ряда y_t рассчитывают критерий

$$\lambda_t = \frac{|x_t - x_{t-1}|}{\sigma_x}; t = 2, 3, \dots, n,$$

где среднеквадратическое отклонение уровней ряда и среднее значение рассчитывают, соответственно, как

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (x_t - \bar{x})^2}{n-1}}; \bar{x} = \frac{\sum_{t=1}^n x_t}{n}.$$

Принципиальным отличием разработанного способа является эффективное применение метода обнаружения аномалий для другой области применения – для поиска разрыва тренда. Для реализации этого были введены новые операции преобразования данных. В их числе:

- модификация метода в форме разбиения проверки на аномальность на три независимых операции;
- применение операции проверки на аномальность центрального наблюдения по отношению участку ряда из наблюдений 1–7, не включающему проверяемое наблюдение, в отличие от известного алгоритма.

Обсуждение

Предложенное дополнение процедуры построения и использования тренда временного ряда контролируемых показателей может привести к выводам, представляющим интерес в смысле изменений в технологии, а также послужить причиной последующего детального анализа. С появлением информации об изменении структуры временного ряда и переходом к кусочной модели изменяются качественные выводы о приближении (или отсутствии такового) параметров изделия к контролируемым пределам. На рис. 2 приведены несколько примеров, иллюстрирующих возникающее преимущество. В то же время отказ от анализа «левого» участка наблюдений и сохранение «правого» (состоящего из последних наблюдений) позволят построить столь же точный прогноз, что и кусочная модель, однако в таком случае информация об изменении структуры временного ряда, которая может быть критически важной для контроля состояния технологического процесса, может оказаться недоступной.

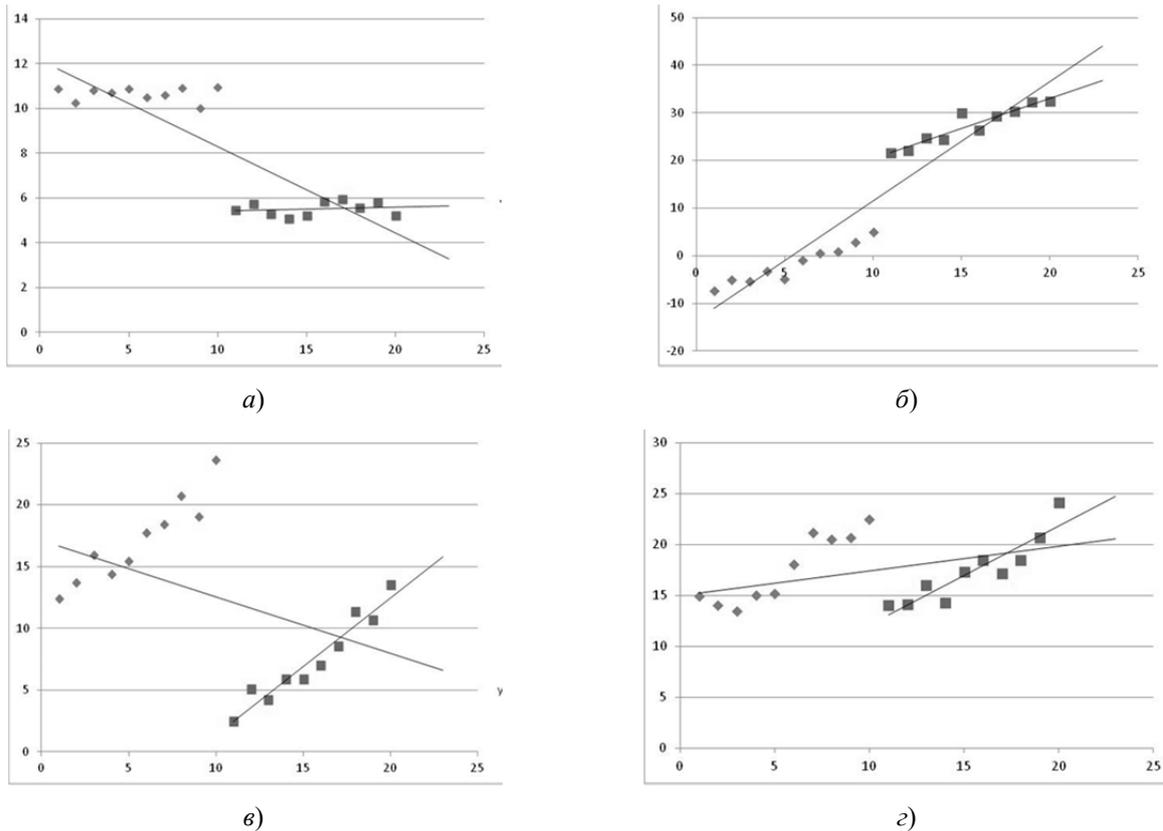


Рис. 2. Сравнение качественных выводов в результате прогнозирования по обобщенной и кусочной модели тренда: а – ошибочный прогноз общей модели о пересечении нижнего предела; б – ошибочный прогноз общей модели о пересечении верхнего предела; в – прогноз общей модели о снижении Y и прогноз кусочной модели об увеличении Y ; г – прогноз обобщенной модели не предсказывает приближение к верхнему пределу

Выводы и рекомендации

Дополнение процедуры построения общей модели тренда как рекомендуемого инструмента анализа контрольной карты [4] обладает рядом новых возможностей. С учетом малого размера анализируемого участка временного ряда представляется целесообразным одновременное осуществление следующих видов анализа:

- проверка наличия аномалий по критерию Ирвина [6];
- проверка наличия тренда по методу Фостера – Стьюарта [7], методу средних [6, 8];
- на основе критерия Чоу [9], выявляющего изменение наклона тренда с помощью критерия Фишера;

– на основе критерия Гуйарати [10], проверяющего существенность изменения параметров модели (1) (если параметр b значим, то произошло существенное изменение постоянной составляющей тренда, если параметр d значим, то произошло существенное изменение наклона тренда).

Достижимым эффектом является возможность получения информативных качественных выводов на основе количественного прогноза [11], полной автоматизации процесса, исключения этапа экспертной оценки, предполагаемого при традиционном использовании перечисленных методов оперативного реагирования на события, послужившие причиной изменения структуры временного ряда. Перечисленные процедуры, примененные к контрольным картам, сохраненным в объемах больших данных [12], могут быть полезными для принятия стратегических решений в области системы контроля качества изделий, выпускаемых поточным способом.

Библиографический список

1. Nancy, R. Tague. Seven Basic Quality Tools. The Quality Toolbox / R. Nancy. – Milwaukee, Wisconsin : American Society for Quality, 2004. – P. 15. – URL: <https://asq.org/quality-resources/seven-basic-quality-tools> (дата обращения 12.02.2019).

2. Control chart. – URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Control_chart (дата обращения 12.02.2019).
3. Управление процессом литья под давлением. – URL: <http://iceberg.name/332-upravlenie-processom-litya-pod-davleniem.html> (дата обращения 12.02.2019).
4. Макино, Т. Контроль качества с помощью персональных компьютеров / Т. Макино, М. Охаси, Х. Докэ, К. Макино. – Москва : Машиностроение, 1991. – 224 с.
5. Прокофьев, О. В. Метод обнаружения сдвига тренда и оценка его функциональной устойчивости // Теоретико-методологические подходы к формированию системы устойчивого развития предприятий, комплексов, регионов / О. В. Прокофьев. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2016. – С. 141–151.
6. Экономико-математические методы и прикладные модели : учебник / В. В. Федосеев, А. Н. Гармаш, И. В. Орлова ; под ред. В. В. Федосеева. – Москва : Юрайт, 2013. – 336 с.
7. Михеев, М. Ю. Методы прогнозирования предаварийной ситуации сложного технического объекта / М. Ю. Михеев, А. Е. Савочкин, О. В. Прокофьев // Управление реформированием социально-экономического развития предприятий, отраслей, регионов (VII МНПК) : сб. науч. тр. – Пенза, 2016. – С. 341–343.
8. Михеев, М. Ю. Модели прогнозирования технического состояния сложных объектов по коротким временным рядам / М. Ю. Михеев, О. В. Прокофьев, А. Е. Савочкин // Телекоммуникации. – 2016. – № 10. – С. 10–115.
9. Прокофьев, О. В. Алгоритмическая модификация теста Чоу для автоматизированной проверки гипотезы о структурной стабильности тренда / О. В. Прокофьев, А. Е. Савочкин // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2014. – № 3 (19). – С. 183–188.
10. Gujarati, D. Econometrics by Example / D. Gujarati. – New York : Palgrave Macmillan, 2011. – 371 p.
11. Тюрин, М. В. Разработка моделей прогнозирования состояния элементов технически сложного объекта / М. В. Тюрин, С. А. Фомин, О. В. Прокофьев // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 1 (13). – С. 73–78.
12. Прокофьев, О. В. Большие данные для нового качественного уровня электроэнергетики / А. В. Николаев, О. В. Прокофьев, М. В. Тюрин, А. Н. Токарев // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2018. – Т. 2. – С. 102–104.

References

1. Nancy R. Tague. *Seven Basic Quality Tools. The Quality Toolbox*. Milwaukee, Wisconsin: American Society for Quality, 2004, p. 15. Available at: <https://asq.org/quality-resources/seven-basic-quality-tools> (accessed Febr. 12, 2019).
2. Control chart. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Control_chart (accessed Febr. 12, 2019).
3. *Upravlenie protsessom lit'ya pod davleniem* [Injection molding process control]. Available at: <http://iceberg.name/332-upravlenie-processom-litya-pod-davleniem.html> (accessed Febr. 12, 2019). [In Russian]
4. Makino T., Okhasi M., Doke Kh., Makino K. *Kontrol' kachestva s pomoshch'yu personal'nykh komp'yuterov* [Quality control via personal computers]. Moscow: Mashinostroenie, 1991, 224 p. [In Russian]
5. Prokofev O. V. *Teoretiko-metodologicheskie podkhody k formirovaniyu sistemy ustoychivogo razvitiya predpriyatiy, kompleksov, regionov* [Theoretical and methodological approaches to the formation of sustainable development of enterprises, complexes, regions]. Penza: Izd-vo Penz. gos. un-ta, 2016, pp. 141–151. [In Russian]
6. Fedoseev V. V., Garmash A. N., Orlova I. V. *Ekonomiko-matematicheskie metody i prikladnye modeli: uchebnik* [Economic and mathematical methods and applied models : textbook]. Moscow: Yurayt, 2013, 336 p. [In Russian]
7. Mikheev M. Yu., Savochkin A. E., Prokofev O. V. *Upravlenie reformirovaniem sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya predpriyatiy, otrasley, regionov (VII MNPK): sb. nauch. tr.* [Management of reform of socio-economic development of enterprises, industries, regions (VII mnpc) : collection of scientific papers]. Penza, 2016, pp. 341–343. [In Russian]
8. Mikheev M. Yu., Prokofev O. V., Savochkin A. E. *Telekommunikatsii* [Telecommunications]. 2016, no. 10, pp. 10–115. [In Russian]
9. Prokofev O. V., Savochkin A. E. *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus* [XXI century: results of the past and problems of the present plus]. 2014, no. 3 (19), pp. 183–188. [In Russian]
10. Gujarati D. *Econometrics by Example*. New York: Palgrave Macmillan, 2011, 371 p.
11. Tyurin M. V., Fomin S. A., Prokofev O. V. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem* [Reliability and quality of complex systems]. 2016, no. 1 (13), pp. 73–78. [In Russian]
12. Prokofev O. V., Nikolaev A. V., Tyurin M. V., Tokarev A. N. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and quality]. 2018, vol. 2, pp. 102–104. [In Russian]

Михеев Михаил Юрьевич

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой информационных
технологий и систем,
Пензенский государственный
технологический университет
(440039, Россия, г. Пенза,
проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11)
E-mail: rector@penzgtu.ru

Прокофьев Олег Владимирович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра информационных
технологий и систем,
Пензенский государственный
технологический университет
(440039, Россия, г. Пенза,
проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11)
E-mail: prokof_ow@mail.ru

Тюрин Михаил Владимирович

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: info@niifi.ru

Ярославцева Дарья Александровна

аспирант,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40);
инженер-конструктор,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: levik_92@mail.ru

Mikheyev Mykhail Yurievich

doctor of technical sciences, professor,
head of sub-department
of informational technologies and systems,
Penza State Technological University
(440039, 1a/11 Baydukov passage / Gagarin street,
Penza, Russia)

Prokofev Oleg Vladimirovich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of informational
technologies and systems,
Penza State Technological University
(440039, 1a/11 Baydukov passage / Gagarin street,
Penza, Russia)

Tyurin Mihail Vladimirovich

candidate of technical sciences, senior researcher,
Scientific Research Institute
of Physical Measurements
(440026, 8/10, Volodarskogo street, Penza, Russia)

Yaroslavtseva Daria Aleksandrovna

postgraduate student,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia);
design engineer,
Scientific Research Institute
of Physical Measurements
(440026, 8/10, Volodarskogo street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Михеев, М. Ю. Анализ короткого временного ряда в карте контроля качества / М. Ю. Михеев, О. В. Прокофьев, М. В. Тюрин, Д. А. Ярославцева // Надежность и качество сложных систем. – 2019. – № 2 (26). – С. 70–78. – DOI 10.21685/2307-4205-2019-2-8.

А. В. Григорьев, А. В. Лысенко, А. С. Подсякин, В. А. Трусов, Н. К. Юрков

ПРИВЕДЕННАЯ ПОГРЕШНОСТЬ ТЕХНОЛОГИИ ИЗМЕРЕНИЯ АППЛИКАТЫ ВИБРАЦИОННОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА РАЗМЫТИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ КРУГЛОЙ МЕТКИ¹

A. V. Grigoriev, A. V. Lysenko, A. S. Podsyakin, V. A. Trusov, N. K. Yurkov

REDUCED ERROR OF MEASUREMENT TECHNOLOGY APPLICATI VIBRATION DISPLACEMENTS BASED ON THE ANALYSIS OF DEFOCUS OF THE IMAGE OF A CIRCULAR MARK

Аннотация. *Актуальность и цели.* Объектом исследования является виброизмерительная технология, основанная на подсчете количества пикселей изображения круглой метки с вибрационным размытием и количества пикселей четкого изображения того же объекта при отсутствии вибрации. Целью работы является разработка методики оценки приведенной погрешности этой виброизмерительной технологии. *Материалы и методы.* Для разработки методик оценки погрешностей виброизмерительной технологии применены методы вероятностного прогнозирования погрешностей и численного моделирования интервалов охвата измеренных значений. *Результаты.* Получены и обоснованы математические формулы для оценки предельной абсолютной погрешности измерения площади изображения круглой метки путем подсчета количества принадлежащих этому изображению пикселей. Получены и обоснованы последовательности математических вычислений для оценки предельной абсолютной погрешности измерения приращения радиуса изображения круглой метки с вибрационным размытием по отношению к радиусу ее изображения при отсутствии вибрации и для оценки приведенной погрешности измерения амплитуды вибрационного перемещения исследуемой точки поверхности объекта контроля по аппликату. *Выводы.* Полученные математические формулы позволяют прогнозировать с заданной доверительной вероятностью погрешность измерения площади изображения круглой метки путем подсчета количества принадлежащего этому изображению пикселей. Разработанные алгоритмы позволяют оценить погрешность измерительного сигнала на основе известного количества пикселей, приходящегося на изображение

Abstract. *Background.* The object of the study is vibration measurement technology based on the calculation of the number of pixels of the image of a circular label with vibration blur and the number of pixels of a clear image of the same object in the absence of vibration. The aim of the work is to develop a methodology for assessing the reduced error of this vibration measurement technology. *Materials and methods.* Methods of probabilistic error prediction and numerical simulation of the coverage intervals of the measured values are used to develop methods for estimating the errors of vibration measurement technology. *Results.* Mathematical formulas for estimation of the maximum absolute error of measurement of the area of the image of a round label by counting the number of pixels belonging to this image are obtained and justified. Sequences of mathematical calculations are obtained and substantiated to estimate the maximum absolute error of measuring the increment of the radius of the image of a circular mark with vibration blur in relation to the radius of its image in the absence of vibration and to estimate the reduced error of measuring the amplitude of the vibration movement of the investigated point of the surface of the object of control on the application. *Summary.* The obtained mathematical formulas make it possible to predict with a given confidence the error of measuring the area of the image of a round label by counting the number of pixels belonging to this image. The developed algorithms allow us to estimate the error of the measurement signal based on the known number of pixels per image of a round label. The developed concepts create prerequisites for the development of techniques, construction of experimental and computational functions that will allow the design of systems for measuring the amplitude of the vibration movement on the ap-

¹ Статья подготовлена в рамках реализации проекта «Адаптивная интеллектуальная система вибрационных испытаний бортовой радиоэлектронной аппаратуры ракетно-космической и авиационной техники нового поколения на основе многофункциональной цифровой генерации испытательных сигналов» (Соглашение № 17-79-10281 от 24.07.2017) при финансовой поддержке Российского научного фонда.

круглой метки. Выработанные концепции создают предпосылки для разработки методик, построения экспериментальных и расчетных функций, которые позволят при проектировании систем измерения амплитуды вибрационного перемещения по аппликату варьировать поле зрения регистрирующего устройства, его разрешающую способность, диаметр круглой метки и приведенную погрешность измерений: задавшись тремя из этих параметров, определить четвертый.

Ключевые слова: вибрация, измерение, разрешающая способность, регистрирующее устройство, расфокусирование, изображение, дискретизация, погрешность, пиксель, растр, амплитуда, аппликата.

application to vary the field of view of the recording device, its resolution, the diameter of the round mark and the reduced measurement error: given three of these parameters, determine the fourth.

Keywords: vibration, measurement, resolution, recording device, defocusing, images, sampling, error, pixel, raster, amplitude, application.

Введение

Развитие технических систем приводит к их усложнению. В связи с этим резко возрастают требования к системам диагностики возникающих в них дефектов [1]. Важным направлением в области диагностирования дефектов радиоэлектронной аппаратуры, машин и механизмов, зданий и сооружений является диагностика вибрационная [2]. Одним из быстро развивающихся методов измерения вибрационных распределений на поверхности объекта контроля является метод анализа размытия изображения матрицы круглых меток, нанесенной на эту поверхность.

Современное состояние вопроса

Моделирование следа размытия изображения круглой метки при ее компланарном и ортогональном виброперемещениях представлено в статье [3]. В работе [4] приведено описание структуры методики измерения параметров вибраций по следу размытия изображения круглой метки. В работе [5] приведено описание структуры методики анализа следа вибрационного размытия изображения круглой метки. Статья [6] моделирует процессы формирования и описания отсчетных сегментов следа вибрационного размытия изображения круглой метки. Анализ отсчетных сегментов следа вибрационного размытия изображения круглой метки приведен в статье [7]. Особенности отображения вектора вибрационного перемещения материальной точки в плоскости изображения раскрываются в статье [8]. Параметры структурного описания размытия изображения круглой метки при возвратно-поступательном вибрационном перемещении исследуемой материальной точки приведены в статье [9]. Анализ размытия изображения круглой метки при возвратно-поступательном вибрационном перемещении исследуемой материальной точки приводится в статье [10]. В статье [11] описан процесс вычисления выходных параметров системы измерения модуля и компонент вектора вибрационного перемещения исследуемой материальной точки объекта контроля. В статье [12] приводится описание методики калибровки системы трехкомпонентного измерения параметров вибраций на основе анализа геометрии следа размытия изображения круглой метки.

Абсолютная погрешность измерительного преобразования

Исследуемая в настоящей статье технология основана на том, что за счет эффекта расфокусирования при приближении к регистрирующему устройству радиус изображения круглой метки увеличивается, а при удалении от него – уменьшается. В результате измерительным сигналом вибрационного перемещения исследуемой точки, которая располагается в геометрическом центре круглой метки, является приращение радиуса изображения круглой метки с вибрационным размытием по отношению к радиусу такого изображения при отсутствии вибрации. Радиус изображения круглой метки измеряется следующим образом. Сначала измеряется площадь этого изображения путем простого подсчета количества пикселей, ему принадлежащих, а затем вычисляется радиус по формуле

$$r_{imt} = \sqrt{\frac{S_{imt}}{\pi}}, \quad (1)$$

где S_{imt} – площадь изображения круглой метки; r_{imt} – радиус изображения круглой метки.

Радиус изображения, как и любой другой линейный размер растрового изображения, измеряется в растровых единицах (*run*) [13]. Под растровой единицей понимается расстояние между центрами соседних в строке или столбце растровой матрицы пикселей. Площадь изображения круглой метки, равная количеству пикселей, этому изображению принадлежащих, измеряется в квадратных растровых единицах (run^2).

В статье [14] показано, что

$$\sigma(S_{imt}) = \sqrt[4]{\frac{1}{18} run^6 \pi S_{imt}}, \quad (2)$$

где $\sigma(S_{imt})$ – среднеквадратичное отклонение погрешности результата измерения площади изображения круглой метки.

Там же показано, что погрешность результата измерения площади изображения круглой метки распределена по нормальному закону. Из этого следует, что погрешность результата измерения площади изображения круглой метки не выйдет за пределы оценки $\Delta S_{imt} = 3\sigma(S_{imt})$ с доверительной вероятностью 99,73 %. Для большинства практических расчетов оценку предельной абсолютной погрешности с такой доверительной вероятностью можно считать приемлемой.

Таким образом, принимая во внимание (2):

$$\Delta S_{imt} = \sqrt[4]{4,5 run^6 \pi S_{imt}}. \quad (3)$$

Из формулы (1) следует, что

$$r_{imtU} = \sqrt{\frac{S_{imtU}}{\pi}}, \quad (4)$$

$$r_{imtL} = \sqrt{\frac{S_{imtL}}{\pi}}, \quad (5)$$

где r_{imtU} и r_{imtL} – верхняя и нижняя границы интервала охвата значений радиуса изображения метки r_{imt} соответственно; S_{imtU} и S_{imtL} – верхняя и нижняя границы интервала охвата значений площади изображения метки S_{imt} соответственно:

$$S_{imtU} = S_{imt} + \Delta S_{imt}, \quad (6)$$

$$S_{imtL} = S_{imt} - \Delta S_{imt}. \quad (7)$$

Из формул (4) и (5) следует, что

$$l_{0U} = \sqrt{\frac{S_{imt0U}}{\pi}}, \quad (8)$$

$$l_{0L} = \sqrt{\frac{S_{imt0L}}{\pi}}, \quad (9)$$

где l_{0U} и l_{0L} , S_{imt0U} и S_{imt0L} – верхняя и нижняя границы интервалов охвата значений l_0 и S_{imt0} соответственно; l_0 – радиус четкого изображения круглой метки при отсутствии вибрации; S_{imt0} – площадь четкого изображения круглой метки при отсутствии вибрации:

$$l_{zU} = \sqrt{\frac{S_{imtzU}}{\pi}}, \quad (10)$$

$$l_{zL} = \sqrt{\frac{S_{imtzL}}{\pi}}, \quad (11)$$

где l_{zU} и l_{zL} , S_{imtzU} и S_{imtzL} – верхняя и нижняя границы интервалов охвата значений l_z и S_{imtz} соответственно; l_z – радиус размытого изображения круглой метки при наличии вибрации; S_{imtz} – площадь размытого изображения круглой метки при наличии вибрации.

По определению:

$$|L_z| = |l_z - l_0|, \tag{12}$$

где L_z – приращение радиуса изображения круглой метки с вибрационным размытием по отношению к радиусу ее четкого изображения при отсутствии вибрации.

Отсюда:

$$|L_z|_U = \begin{cases} l_{zU} - l_{0L}, & \text{если } l_z \geq l_0, \\ l_{0U} - l_{zL}, & \text{если } l_z < l_0; \end{cases} \tag{13}$$

$$|L_z|_L = \begin{cases} l_{zL} - l_{0U}, & \text{если } (l_z \geq l_0) \cap (l_{zL} \geq l_{0U}), \\ 0, & \text{если } (l_z \geq l_0) \cap (l_{zL} < l_{0U}), \\ l_{0L} - l_{zU}, & \text{если } (l_z < l_0) \cap (l_{0L} \geq l_{zU}), \\ 0, & \text{если } (l_z < l_0) \cap (l_{0L} < l_{zU}), \end{cases} \tag{14}$$

где $|L_z|_U$ и $|L_z|_L$ – соответственно верхняя и нижняя границы интервала охвата значений $|L_z|$.

Предельная абсолютная погрешность $\Delta|L_z|$ определится по формуле

$$\Delta|L_z| = \begin{cases} |L_z|_U - |L_z|, & \text{если } |L_z|_U - |L_z| \geq |L_z| - |L_z|_L, \\ |L_z| - |L_z|_L, & \text{если } |L_z|_U - |L_z| < |L_z| - |L_z|_L, \end{cases} \tag{15}$$

т.е. в качестве предельной абсолютной погрешности $\Delta|L_z|$ принимается наибольшее по абсолютной величине отклонение измеренного приращения радиуса изображения метки от истинного.

Приведенная погрешность измерительного преобразования

Для оценки возможностей измерительного преобразования пользуются понятием о приведенной погрешности этого преобразования. Под приведенной погрешностью измерительного преобразования стандарт [15] понимает отношение предельной абсолютной погрешности измерительного преобразования к нормирующему значению измеряемой величины.

Применительно к данному измерительному преобразованию это означает

$$\delta_N M = \frac{\Delta M(M_N)}{M_N}, \tag{16}$$

где $\delta_N M$ – приведенная погрешность измерительного преобразования вибрационного перемещения исследуемой материальной точки в абсолютную величину приращения радиуса изображения круглой метки, нанесенной на поверхность объекта контроля; M_N – нормирующее значение вибрационного перемещения; $\Delta M(M_N)$ – предельная абсолютная погрешность измерительного преобразования при вибрационном перемещении исследуемой материальной точки M равном M_N .

Как было показано в начале предыдущего раздела настоящей статьи, абсолютная величина приращения радиуса изображения круглой метки с вибрационным размытием по отношению к радиусу ее четкого изображения при отсутствии вибрации $|L_z|$ является измерительным сигналом вибрационного перемещения исследуемой точки по аппликату.

Если зависимость измерительного сигнала $|L_z|$ от измеряемой величины M является линейной, то

$$\frac{\Delta|L_z|}{|L_z|} = \frac{\Delta M}{M}$$

или

$$\frac{\Delta|L_z|(M_N)}{|L_z|(M_N)} = \frac{\Delta M(M_N)}{M_N},$$

где $|L_z|(M_N)$ и $\Delta|L_z|(M_N)$ – соответственно абсолютная величина приращения радиуса и предельная абсолютная погрешность ее измерения при $M = M_N$.

Из этого и формулы (16) следует, что при линейной градуировочной характеристике измерительного преобразования приведенная погрешность этого преобразования, выраженная в процентах, будет равна

$$\delta_N M = \frac{\Delta |L_z| (M_N)}{|L_z| (M_N)} \cdot 100 \% . \quad (17)$$

Важной характеристикой данного измерительного преобразования является относительное приращение радиуса изображения круглой метки при нормирующем значении вибрационного перемещения исследуемой материальной точки $L_{zrel}(M_N)$:

$$L_{zrel}(M_N) = \frac{L_z(M_N)}{l_0} \cdot 100 \% . \quad (18)$$

Зная площадь изображения метки при отсутствии вибрации S_{imt0} и относительное приращение радиуса изображения круглой метки при нормирующем значении вибрационного перемещения исследуемой материальной точки $L_{zrel}(M_N)$, можно вычислить приведенную погрешность измерения вибрационного перемещения $\delta_N M$. Для этого необходимо сначала вычислить радиус изображения метки при отсутствии вибрации l_0 . Из формулы (1) следует, что

$$l_0 = \sqrt{\frac{S_{imt0}}{\pi}} . \quad (19)$$

Затем вычислить приращение радиуса изображения метки при нормирующем значении вибрационного перемещения исследуемой материальной точки $L_z(M_N)$:

$$L_z(M_N) = \frac{L_{zrel}(M_N) l_0}{100\%} . \quad (20)$$

Формула (20) получена как решение уравнения (18).

На основании известных l_0 и $L_z(M_N)$ вычисляется радиус изображения метки при нормирующем значении вибрационного перемещения $l_z(M_N)$:

$$l_z(M_N) = l_0 + L_z(M_N) . \quad (21)$$

Площадь изображения метки при нормирующем значении вибрационного перемещения вычисляется по формуле

$$S_{imtz}(M_N) = \pi l_z^2(M_N) . \quad (22)$$

Предельные абсолютные погрешности ΔS_{imt0} и $\Delta S_{imtz}(M_N)$ вычисляются на основании формулы (3)

$$\Delta S_{imt0} = \sqrt[4]{4,5 \text{run}^6 \pi S_{imt0}} ; \quad (23)$$

$$\Delta S_{imtz}(M_N) = \sqrt[4]{4,5 \text{run}^6 \pi S_{imtz}(M_N)} . \quad (24)$$

Границы интервалов охвата значений S_{imt0} и $S_{imtz}(M_N)$ вычисляются по формулам (6) и (7)

$$S_{imt0U} = S_{imt0} + \Delta S_{imt0} ; \quad (25)$$

$$S_{imt0L} = S_{imt0} - \Delta S_{imt0} ; \quad (26)$$

$$S_{imtzU}(M_N) = S_{imtz}(M_N) + \Delta S_{imtz}(M_N) ; \quad (27)$$

$$S_{imtzL}(M_N) = S_{imtz}(M_N) - \Delta S_{imtz}(M_N) . \quad (28)$$

После этого путем последовательных вычислений по формулам (8–15, 17) определяется приведенная погрешность измерения вибрационного перемещения исследуемой материальной точки на поверхности объекта контроля $\delta_N M$.

Зависимость $\delta_N M$ от S_{iml0} строится путем последовательного задания значений S_{iml0} в определенном диапазоне с определенным шагом и вычисления значений $\delta_N M$ по методике, изложенной в настоящем пункте.

По этой зависимости, зная поле зрения регистрирующего устройства, его разрешающую способность и диаметр круглой метки, можно определить площадь изображения метки и далее – приведенную погрешность измерений. Или, наоборот, задавшись требуемой приведенной погрешностью, подобрать регистрирующее устройство, его поле зрения и диаметр метки. Сказанное относится и к варианту, при котором на участок поверхности объекта контроля наносится не одна метка, а матрица меток с целью контроля распределения вибрационных перемещений материальных точек на этом участке объекта контроля.

Заключение

Выведена формула предельной абсолютной погрешности измерения площади изображения круглой метки путем подсчета количества пикселей, этому изображению принадлежащих.

Разработана и обоснована методика оценки предельной абсолютной погрешности измерения приращения радиуса изображения круглой метки с вибрационным размытием по отношению к радиусу ее четкого изображения при отсутствии вибрации.

Разработана и обоснована методика оценки приведенной погрешности измерения амплитуды вибрационного перемещения на основе подсчета количества пикселей, принадлежащих четкому изображению круглой метки при отсутствии вибрации и ее изображению с вибрационным размытием.

Библиографический список

1. Кузнецов, Н. С. Гибридный интеллект инженерии гетероструктур вычислительной техники / Н. С. Кузнецов, В. В. Смогунов, Л. Р. Фионова, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 3 (23). – С. 85–97.
2. Особенности разработки макромоделей надежности сложных электронных систем / Н. К. Юрков, А. В. Затылкин, С. Н. Полесский, И. А. Иванов, А. В. Лысенко // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2014. – Т. 1. – С. 101–102.
3. Моделирование следа размытия изображения круглой метки при ее компланарном и ортогональном виброперемещениях / А. В. Григорьев, В. А. Трусов, В. Я. Баннов, П. Г. Андреев, Г. В. Таньков // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2015. – Т. 1. – С. 107–109.
4. Структура методики измерения параметров вибраций по следу размытия изображения круглой метки / А. В. Григорьев, Е. А. Данилова, С. А. Бростилов, И. Ю. Наумова, Э. В. Лапшин, А. А. Баранов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2015. – Т. 2. – С. 13–16.
5. Григорьев, А. В. Структура методики анализа следа вибрационного размытия изображения круглой метки / А. В. Григорьев, Н. К. Юрков, В. А. Трусов, В. Я. Баннов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2016. – Т. 2. – С. 28–31.
6. Григорьев, А. В. Формирование и описание отсчетных сегментов следа вибрационного размытия изображения круглой метки / А. В. Григорьев, А. В. Затылкин, А. В. Лысенко, Г. В. Таньков // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2016. – Т. 2. – С. 31–37.
7. Анализ отсчетных сегментов следа вибрационного размытия изображения круглой метки / А. В. Григорьев, И. И. Кочегаров, С. А. Бростилов, Н. В. Горячев, П. Г. Андреев // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2016. – Т. 2. – С. 37–41.
8. Каражанов, Б. Б. Особенности отображения вектора вибрационного перемещения материальной точки в плоскости изображения / Б. Б. Каражанов, А. В. Григорьев, Е. А. Данилова, А. К. Гришко // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2017. – Т. 2. – С. 16–20.
9. Структурное описание размытия изображения круглой метки при возвратно-поступательном вибрационном перемещении исследуемой материальной точки / Г. Ж. Надырбеков, А. В. Григорьев, И. И. Кочегаров, А. В. Лысенко, Н. А. Стрельцов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2017. – Т. 2. – С. 11–13.
10. Анализ размытия изображения круглой метки при возвратно-поступательном вибрационном перемещении исследуемой материальной точки / Д. Х. Нуржанов, А. В. Григорьев, В. А. Трусов, В. Я. Баннов, Н. А. Стрельцов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2017. – Т. 2. – С. 14–16.
11. Вычисление выходных параметров системы измерения модуля и компонент вектора вибрационного перемещения исследуемой материальной точки объекта контроля / А. В. Григорьев, А. К. Гришко,

- Э. В. Лапшин, И. Ю. Наумова, Е. А. Данилова, Н. К. Юрков // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2016. – Т. 2. – С. 41–44.
12. Методика калибровки системы трехкомпонентного измерения параметров вибраций на основе анализа геометрии следа размытия изображения круглой метки / А. В. Григорьев, В. Б. Алмаметов, А. И. Долотин, А. Г. Царев, Г. Г. Беликов, А. К. Гришко // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2015. – Т. 2. – С. 16–19.
 13. ГОСТ 27459-87 Системы обработки информации. Машинная графика. Термины и определения. – Москва : Стандартиформ, 2014. – 30 с.
 14. Григорьев, А. В. Вероятностное прогнозирование погрешностей измерения радиуса изображения круглой метки по технологиям подсчета строк и пикселей / А. В. Григорьев, А. А. Чибриков, Г. В. Таньков, Е. А. Данилова // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2018. – Т. 1. – С. 252–254.
 15. РМГ 29-2013. Метрология. Основные термины и определения. – Москва, 1988. – 10 с.

References

1. Kuznetsov N. S., Smogunov V. V., Fionova L. R., Yurkov N. K. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2018, no. 3 (23), pp. 85–97. [In Russian]
2. Yurkov N. K., Zatytkin A. V., Poleskiy S. N., Ivanov I. A., Lysenko A. V. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and quality]. 2014, vol. 1, pp. 101–102. [In Russian]
3. Grigor'ev A. V., Trusov V. A., Bannov V. Ya., Andreev P. G., Tan'kov G. V. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and quality]. 2015, vol. 1, pp. 107–109. [In Russian]
4. Grigor'ev A. V., Danilova E. A., Brostilov S. A., Naumova I. Yu., Lapshin E. V., Baranov A. A. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and quality]. 2015, vol. 2, pp. 13–16. [In Russian]
5. Grigor'ev A. V., Yurkov N. K., Trusov V. A., Bannov V. Ya. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and quality]. 2016, vol. 2, pp. 28–31. [In Russian]
6. Grigor'ev A. V., Zatytkin A. V., Lysenko A. V., Tan'kov G. V. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and quality]. 2016, vol. 2, pp. 31–37. [In Russian]
7. Grigor'ev A. V., Kochegarov I. I., Brostilov S. A., Goryachev N. V., Andreev P. G. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and quality]. 2016, vol. 2, pp. 37–41. [In Russian]
8. Karazhanov B. B., Grigor'ev A. V., Danilova E. A., Grishko A. K. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and quality]. 2017, vol. 2, pp. 16–20. [In Russian]
9. Nadyrbekov G. Zh., Grigor'ev A. V., Kochegarov I. I., Lysenko A. V., Strel'tsov N. A. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and quality]. 2017, vol. 2, pp. 11–13. [In Russian]
10. Nurzhanov D. Kh., Grigor'ev A. V., Trusov V. A., Bannov V. Ya., Strel'tsov N. A. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and quality]. 2017, vol. 2, pp. 14–16. [In Russian]
11. Grigor'ev A. V., Grishko A. K., Lapshin E. V., Naumova I. Yu., Danilova E. A., Yurkov N. K. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and quality]. 2016, vol. 2, pp. 41–44. [In Russian]
12. Grigor'ev A. V., Almametov V. B., Dolotin A. I., Tsarev A. G., Belikov G. G., Grishko A. K. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and quality]. 2015, vol. 2, pp. 16–19. [In Russian]
13. *GOST 27459-87 Sistemy obrabotki informatsii. Mashinnaya grafika. Terminy i opredeleniya* [GOST 27459-87 System of information processing. Computer graphics. Terms and definitions]. Moscow: Standartinform, 2014, 30 p. [In Russian]
14. Grigor'ev A. V., Chibrikov A. A., Tan'kov G. V., Danilova E. A. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and quality]. 2018, vol. 1, pp. 252–254. [In Russian]
15. *RMG 29-2013. Metrologiya. Osnovnye terminy i opredeleniya* [RMG 29-2013. Metrology. Basic terms and definitions]. Moscow, 1988, 10 p. [In Russian]

Григорьев Алексей Валерьевич

кандидат технических наук, доцент,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: a_grigorev@mail.ru

Лысенко Алексей Владимирович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: lysenko_av@bk.ru

Подсякин Андрей Сергеевич

аспирант,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: kipra@pnzgu.ru

Трусов Василий Анатольевич

кандидат технических наук, доцент,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: trusov_v@mail.ru

Юрков Николай Кондратьевич

доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ,
заведующий кафедрой конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: yurkov_NK@mail.ru

Grigoriev Alexey Valeryevich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of radio equipment design
and production,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Lysenko Alexey Vladimirovich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of radio equipment design
and production,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Podsyakin Andrey Sergeevich

postgraduate student,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Trusov Vasily Anatolievich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of radio equipment design
and production,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Yurkov Nikolay Kondratievich

doctor of technical sciences, professor,
the honoured worker of science
of the Russian Federation,
head of sub-department of radio equipment design
and production,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Приведенная погрешность технологии измерения аппликаты вибродвижения на основе анализа размытия изображения круглой метки / А. В. Григорьев, А. В. Лысенко, А. С. Подсякин, В. А. Трусов, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2019. – № 2 (26). – С. 79–86. – DOI 10.21685/2307-4205-2019-2-9.

Ю. А. Романенко, В. В. Свиридов

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ВЫБОРУ СРЕДСТВ ОХРАНЫ КРИТИЧЕСКИ ВАЖНОГО ОБЪЕКТА

Yu. A. Romanenko, V. V. Sviridov

METHODICAL APPROACH TO THE CHOICE OF MEANS PROTECTION OF CRITICAL OBJECT

Аннотация. Предложен методический подход к рациональному выбору средств охраны для оптимальной защищенности критически важных объектов (КВО), зависящих от степени значимости объекта, возникающей опасности, а также специфики его функционирования. Приоритетными направлениями в деятельности по предупреждению террористических актов являются: оценка защищенности КВО от террористических атак, прогнозирование и оценка эффективности противодействия террористическим атакам на основе комплексного анализа защищенности объекта, создание современных эффективных методов рационального выбора средств и систем охраны КВО.

Ключевые слова: критически важный объект, защищенность, методический подход.

Abstract. The article proposes a methodical approach to the rational choice of security tools for optimal protection of critical objects (CEP), depending on the degree of importance of the object, the emerging danger, as well as the specifics of its functioning. Priority areas in the prevention of terrorist acts are: assessment of the protection of the QUO from terrorist attacks, forecasting and evaluating the effectiveness of countering terrorist attacks on the basis of a comprehensive analysis of the security of the object, the creation of modern effective methods of rational choice of means and systems of protection of the QUO.

Keywords: critical object, security, methodical approach.

Важной составной частью проблемы обеспечения надежной безопасности страны является поддержание высокоэффективной защиты критически важных объектов от действий специальных формирований и отдельных нарушителей. Особая значимость ее решения следует из анализа возможного ущерба, наносимого объектам в целом, в вооруженных конфликтах угрожаемого периода, а также в локальных и крупномасштабных войнах.

Критически важные объекты (далее – КВО) – объекты, нарушение (прекращение) функционирования которых приводит к потере управления экономикой страны, субъекта или административно-территориальной единицы, ее необратимому негативному изменению (разрушению, существенному снижению) безопасности жизнедеятельности населения [3].

В перечень КВО входят: атомные электростанции, объекты ядерно-топливного, нефтегазового, энергетического и оборонного комплексов, крупные инженерные сооружения, гидроузлы, металлургические и химические производства и т.д.

Одной из важнейших составляющих технического обеспечения антитеррористической защищенности КВО Российской Федерации являются технические средства и системы безопасности. Многорубежное построение технических средств физической защиты, активное применение датчиков различного принципа действия с высокими вероятностями обнаружения, систем управления доступом и охранной сигнализации, систем оптико-электронного наблюдения значительно снижают вероятность достижения нарушителем своей цели.

Под важностью (защищенности) охраны объекта следует понимать количественную характеристику, ее значимость в общей системе защищенности объекта, предпочтительность охраны (защищенности) по сравнению с другими объектами.

Рассмотрим методику выбора средств охраны (защищенности) объекта, исходя из требуемого состава, реальных возможностей по выделению средств охраны (рис. 1).

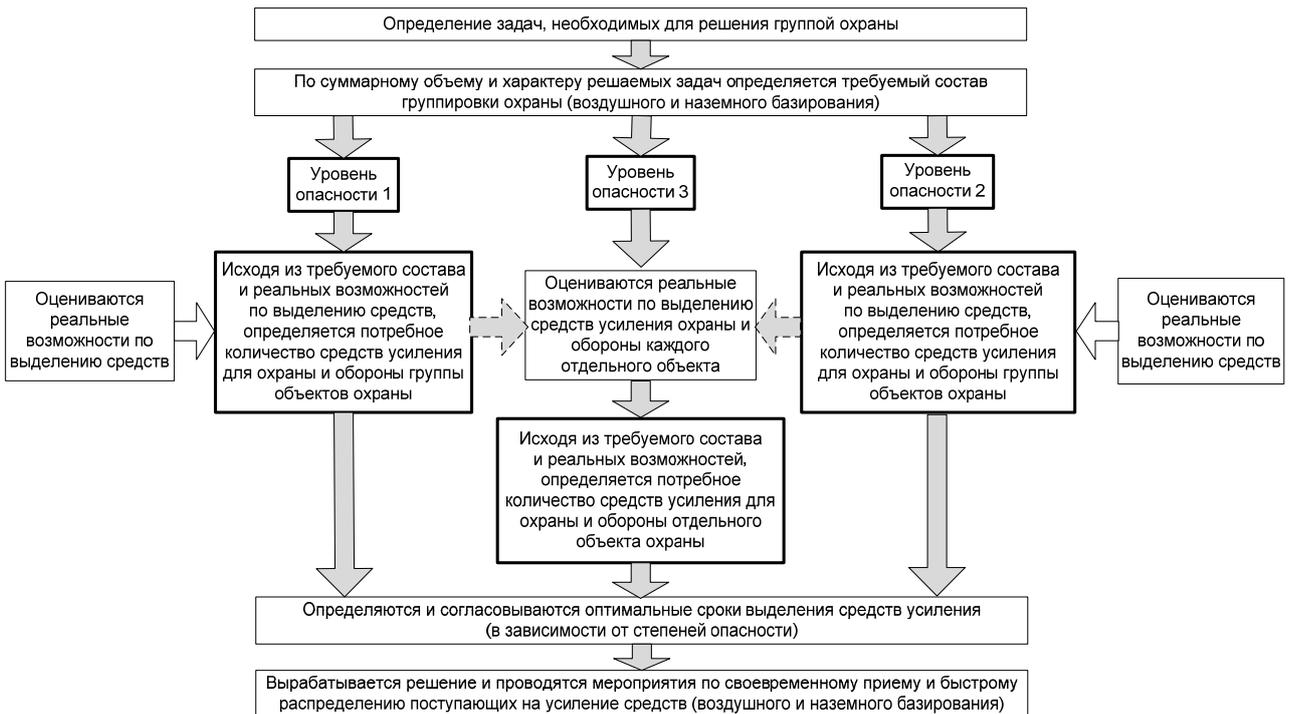


Рис. 1. Методика выбора средств охраны критически важного объекта

В настоящее время существуют методики, требования к которым по оценке важности критически важных объектов состоят в следующем [1]:

- относительная простота – методика должна позволять проводить оценку важности значительного числа критически важных объектов в заданные сроки;
- непротиворечивость результатов оценки – основной показатель качества методики;
- объективность оценки – полнота учета различных факторов и условий, определяющих важность критически важных объектов;
- универсальность – методика должна позволять оценивать важность критически важных объектов независимо от их типа и ведомственной принадлежности.

Анализ существующих методик по оценке важности выбора объекта охраны показывает, что они не могут быть применены к оценке важности выбора средства охраны (защищенности) объекта в силу наличия «каскадного эффекта» их поражения, приводящего к результатам, несоизмеримым с прямым ущербом, наносимым объекту охраны.

Следуя из анализа, методика важности выбора необходимого средства охраны (защищенности) объекта должна отражать его значимость, возникающую опасность, а также специфику функционирования объекта.

В общем виде важность выбора средства охраны k -типа (например, беспилотный летательный аппарат) можно выразить через возникающую опасность объекту охраны, при не выборе данного средства, отнесенную к суммарному m -типу всех средств охраны (СО), для сохранения объекта:

$$S_k = \frac{H_k}{H_m}, \tag{1}$$

где S_k – коэффициент важности выбора k -типа средства охраны; H_k – уровень важности выбора средства охраны k -типа; H_m – суммарный уровень важности m -типа средств охраны.

При этом

$$H_m = \sum_{k=1}^j H_k N_k, \tag{2}$$

где j – количество типов средств охраны в составе m -типа; N_k – количество средств охраны k -типа.

Потенциальная опасность для критически важного объекта определяется характером и масштабом ситуации, возникающей при угрозе его поражения.

При этом ущерб, нанесенный объекту, носит векторный характер, и он разнороден (политические последствия, людские потери, материальные, экономические затраты на восстановление, экологический вред и т.д.). Все средства охраны объекта имеют различный принцип действия, но предназначены для решения задачи охраны объекта. Оценить их вклад затруднительно.

Уровень охраны объекта средствами зависит от действия ряда факторов риска, возникающих при обнаружении и поражении объекта охраны. Каждое средство охраны вносит долю защищенности объекта.

Предлагается долю защищенности объекта средством охраны определить в соответствии с его рейтингом в ряду действующих факторов защиты и уровнем влияния на общую защищенность объекта. Тогда уровень защищенности объекта k -м средством определится из выражения

$$H_k = \sum_{i=1}^I R_{ik} V_{ik}, \quad (3)$$

где R_{ik} – рейтинг i -го фактора защиты, действующего при выборе k -го средства охраны; V_{ik} – уровень влияния i -го фактора защиты k -м средством охраны на защищенность объекта; I – количество факторов защиты, учитываемых при определении уровня защищенности объекта k -м средством.

Тогда в соответствии с (1) коэффициент важности выбора k -го средства для защищенности объекта определяется из выражения

$$S_k = \frac{\sum_{i=1}^I R_{ik} V_{ik}}{\sum_{k=1}^j \sum_{i=1}^I R_{ik} V_{ik} N_{ik}}. \quad (4)$$

Совокупность выбора средств охраны, принадлежащих к одной группе по функциональной принадлежности, определяет задачу защищенности объекта.

Таковыми задачами может быть охрана стационарных критически важных объектов, охрана при перевозке опасных грузов, при строительстве и/или изготовлении новых видов специализированной аппаратуры при различных уровнях опасности.

При этом задачи по защищенности объекта в различных уровнях опасности могут решаться последовательно либо одновременно. Следовательно, необходимо распределить средства охраны по решаемым задачам защищенности в различных уровнях опасности.

Вполне очевидно, что важность задачи будет определяться суммарной защищенностью объекта охраны. Тогда коэффициент важности z -й задачи S_z , решаемой при защите объекта, может быть выражен через отношение защищенности, возникающей при охране объекта для достижения целей операции:

$$S_z = \frac{\sum_{k=1}^j H_{kz} N_{kz}}{\sum_{z=1}^P \sum_{k=1}^j H_{kz} N_{kz}}, \quad (5)$$

где H_{kz} – уровень защищенности объекта k -м средством, выбранным в ходе выполнения z -й задачи; N_{kz} – количество средств k -го типа, выбранных для защиты объекта при решении z -й задачи; K – количество типов средств охраны, выбранных для защиты объекта при решении z -й задачи; P – уровень защищенности объекта средством охраны, при решении z -й задачи.

С учетом формулы (4) выражение (5) принимает вид

$$S_z = \frac{\sum_{k=1}^j \sum_{i=1}^I R_{ikz} V_{ikz} N_{kz}}{\sum_{z=1}^P \sum_{k=1}^j \sum_{i=1}^I R_{ikz} V_{ikz} N_{kz}}. \quad (6)$$

Таким образом, в основе предлагаемой методики выбора средств охраны (защищенности) объекта и решаемых в операции задач по охране объекта лежит его значимость по рейтингу факторов риска, возникающих при охране объекта, а также уровням их влияния.

Для оценки уровня защищенности необходимо как минимум установить масштабы ущерба, т.е. определить количественные показатели в натуральных или условных единицах.

Разработка методических подходов к решению задачи оценки важности критически важных объектов Российской Федерации на сегодняшний день является актуальной задачей. С установлением единых методических подходов к их ранжированию решается главная задача – нанесение максимального ущерба при минимальных собственных затратах сил и средств [2, 3].

Вместе с тем остро стоит вопрос о едином методическом подходе к рациональному выбору средства охраны критически важного объекта, требующего определенного уровня защищенности в зависимости от уровней воздействия (опасности) на него, например террористических групп.

Библиографический список

1. Ильинов, Е. В. К вопросу о методике ранжирования критически важных объектов противника / Е. В. Ильинов, В. П. Ярыгин // Военное искусство. – 2012. – № 4 (41). – С. 64–68.
2. Микрюков, В. Ю. Теория взаимодействия войск / В. Ю. Микрюков. – 2-е изд. – Москва : Вузовская книга, 2006. – 238 с.
3. Кузьмичев, В. В. ФЦНВТ и безопасность критически важных объектов / В. В. Кузьмичев, Д. А. Скрипачев. – Москва : ФГУП «СНПО «Элерон», 2011. – 235 с.

References

1. Il'inov E. V., Yarygin V. P. *Voennoe iskusstvo* []. 2012, no. 4 (41), pp. 64–68. [In Russian]
2. Mikryukov V. Yu. *Teoriya vzaimodeystviya voysk* []. 2nd ed. Moscow: Vuzovskaya kniga, 2006, 238 p. [In Russian]
3. Kuz'michev V. V., Skripachev D. A. *FTsNVT i bezopasnost' kriticheski vazhnykh ob"ektov* []. Moscow: FGUP «SNPO «Eleron», 2011, 235 p. [In Russian]

Романенко Юрий Александрович

доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ,
научно-исследовательский отдел,
Филиал военной академии ракетных войск
стратегического назначения имени Петра Великого
(142210, Россия, г. Серпухов, ул. Бригадная, 17)
E-mail: romanenko-55@inbox.ru

Свиридов Виктор Викторович

кандидат технических наук,
научно-исследовательский отдел,
Филиал военной академии ракетных войск
стратегического назначения имени Петра Великого
(142210, Россия, г. Серпухов, ул. Бригадная, 17)
E-mail: info@rsvn.ru

Romanenko Yuriy Aleksandrovich

doctor of technical sciences, professor,
the honoured worker of science
of the Russian Federation,
scientific research department,
Peter the Great Military Academy
of the Strategic Missile Troops, Serpukhov branch
(142210, 17 Brigadnaya street, Serpukhov, Russia)

Sviridov Viktor Viktorovich

candidate of technical sciences,
scientific research department,
Peter the Great Military Academy
of the Strategic Missile Troops,
Serpukhov branch
(142210, 17 Brigadnaya street, Serpukhov, Russia)

Образец цитирования:

Романенко, Ю. А. Методический подход к выбору средств охраны критически важного объекта / Ю. А. Романенко, В. В. Свиридов // Надежность и качество сложных систем. – 2019. – № 2 (26). – С. 87–90. – DOI 10.21685/2307-4205-2019-2-10.

Р. Ш. Мусаев, А. В. Ляшенко, М. В. Тюрин, Д. А. Ярославцева

**ПРИМЕНЕНИЕ CALS-ТЕХНОЛОГИЙ И СИСТЕМ
АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ
ПРИ СОЗДАНИИ ДАТЧИКО-ПРЕОБРАЗУЮЩЕЙ АППАРАТУРЫ
И СИСТЕМ ДЛЯ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ
И НАЗЕМНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ**

R. Sh. Musaev, A. V. Lyashenko, M. V. Tyurin, D. A. Yaroslavtseva

**APPLICATION OF CALS-TECHNOLOGIES AND COMPUTER-AIDED DESIGN
SYSTEMS WHEN DEVELOPING SENSING-AND-TRANSDUCING
DEVICES AND SYSTEMS FOR ROCKET AND SPACE EQUIPMENT
AND GROUND-BASED SPACE INFRASTRUCTURE**

Аннотация. Актуальность и цели. Показано использование передовых подходов к разработке и изготовлению датчико-преобразующей аппаратуры (ДПА) для ракетно-космической техники (РКТ). Цель работы представить несколько примеров использования CALS-технологий при разработке ДПА, нормализующих преобразователей и систем на их основе. *Материалы и методы.* Перспективным направлением в разработке ДПА является использование методов CALS-технологий – систем автоматизированного проектирования (САПР): SolidWorks, Ansys Workbench, Simulink, Matlab, Electronics Workbench. *Результаты.* Представлены 3D-модель датчика абсолютного давления с использованием программы SolidWorks для последующего расчета в модуле Simulation, расчет деформаций чувствительного элемента от действующего на него давления потока жидкости моделируется с помощью модуля Flow Simulation. Следующий пример моделирования – определение влияния внешних воздействующих факторов (температура от минус 196 °С и 700 °С, статическое давление 63 МПа, перегрузка статического давления 70,5 МПа и др.) на работоспособность пьезоэлектрического датчика давления. Также показана 3D-модель аккумуляторного модуля при воздействии на него ударных и вибрационных нагрузок, рассчитанная с помощью модуля Simulation с учетом физико-механических характеристик материала аккумуляторного модуля. *Выводы.* Показана целесообразность применения моделирования датчико-преобразующей аппаратуры с использованием CALS-технологий, программного обеспечения SolidWorks, Ansys Workbench, Simulink, Matlab, Electronics Workbench, эмпирического моделирования, что позволяет сократить сроки, повысить надежность ДПА и оптимизировать экономические показатели разработки.

Abstract. Background. Advanced approaches to development and manufacture of sensing and transducing devices (STD) for rocket and space equipment (RSE) have been illustrated. The work objective is to present several examples of CALS-technologies application while developing STD, normalizing transducers and systems based on them. *Materials and methods.* Advanced perspectives for STD development include application of CALS-technologies - computer-aided design systems (CAD): Solid Works, Ansys Workbench, Simulink, Matlab, Electronics Workbench. *Results.* 3D-model of absolute pressure sensor based on SolidWorks for the following calculation in Simulation module has been presented, analysis of sensing element deformation due to fluid flow pressure is simulated by means of Flow Simulation module. Another display of simulation is to define the impact of external influencing factors (temperature from minus 196 °C and 700 °C, static pressure 63 MPa, static overpressure 70.5 MPa, etc.) on durability of piezoelectric pressure sensor. 3D-model of battery module under shock and vibration load has been also presented, the model having been calculated by means of Simulation module with provision for physical and mechanical characteristics of battery module material. *Conclusions.* Applicability of sensing-and-transducing devices simulation involving CALS-technologies, SolidWorks, AnsysWorkbench, Simulink, Matlab, ElectronicsWorkbench software and empirical simulation has been presented considering that it provides time reduction, reliability improvement of sensing and transducing devices, and enhancement of economic performance for R&D product.

Ключевые слова: CALS-технологии, датчик абсолютного давления, пьезоэлектрический датчик давления, датчик линейных перемещений, аккумуляторный модуль, многоканальный измерительный преобразователь.

Keywords: CALS-technologies, absolute pressure sensor, piezoelectric pressure sensor, linear displacement transducer, battery module, multichannel instrument converter.

Введение

Для предприятий ракетно-космической отрасли, одной из наукоемких отраслей экономики, характерно использование самых передовых подходов к разработке и изготовлению как масштабных изделий в целом, так и их составных частей и аппаратуры, входящей в их комплектацию. В частности, для проектирования и производства датчиков-преобразующей аппаратуры (ДПА) для ракетно-космической техники (РКТ) используются CALS-технологии и системы автоматизированного проектирования (САПР).

АО «НИИФИ» (входит в корпорацию АО «РКС») – головное предприятие ГК «Роскосмос» в области проектирования и производства датчиков физических величин и систем на их основе, в своем арсенале имеет и успешно использует следующее программное обеспечение CALS-технологий: SolidWorks, Ansys Workbench, Simulink, Matlab, Electronics Workbench и др.

В данной статье представлены несколько примеров использования программного обеспечения CALS-технологий при разработке датчиков-преобразующей аппаратуры.

САПР классифицируют (рис. 1) по [1–3]:

- типу/разновидности и сложности объекта проектирования;
- уровню и комплексности автоматизации проектирования;
- характеру и количеству выпускаемых документов;
- количеству уровней в структуре технического обеспечения.

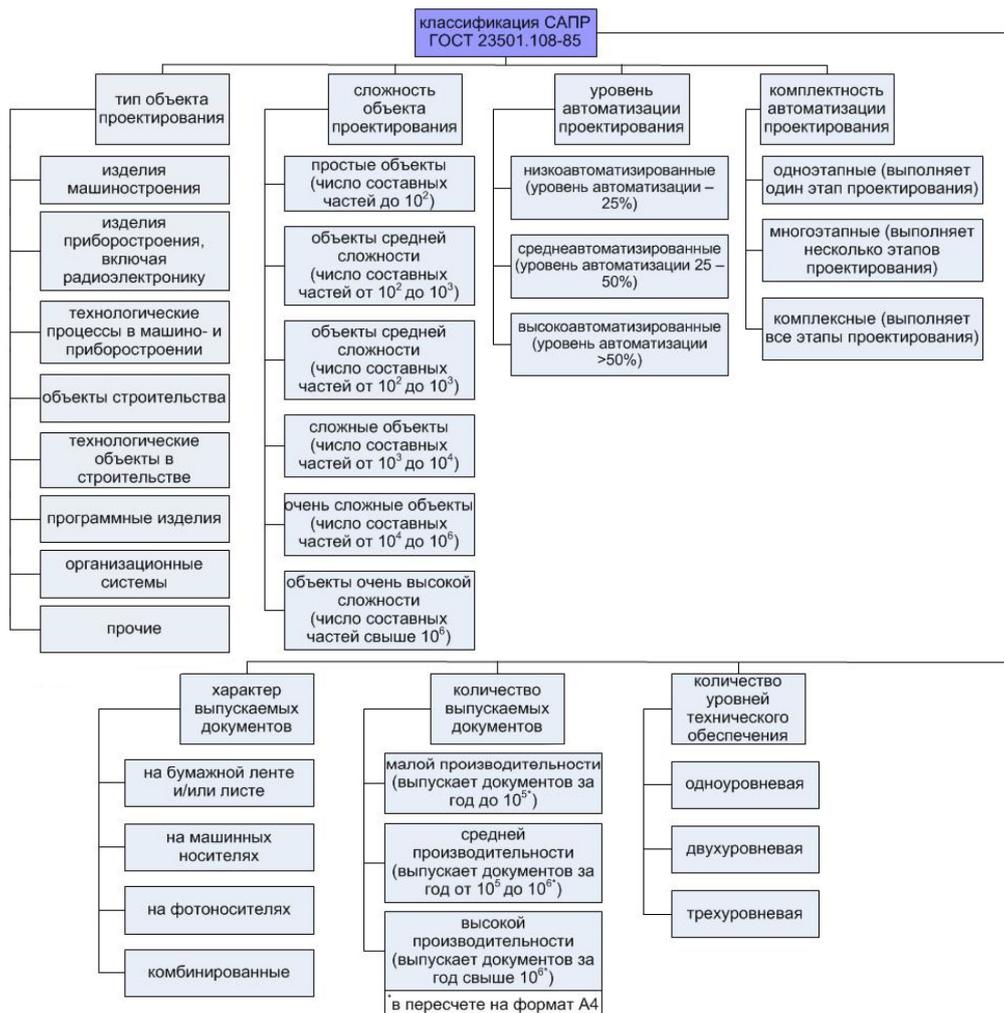


Рис. 1. Классификация САПР

Несмотря на высокий современный уровень развития науки и техники, проблемы измерения физических величин остаются актуальными из-за экстремальных условий эксплуатации первичных средств измерений (датчиков), какие имеют место в РКТ и наземной космической инфраструктуре (НКИ) [4, 5].

Дальнейшее развитие ДПА для РКТ и НКИ как в России, так и в ведущих зарубежных странах сводится в конечном счете к совершенствованию эксплуатационно-технических характеристик, сокращению сроков разработки и оптимизации экономических показателей. Учитывая современные требования к ДПА, работающей в жестких условиях эксплуатации, основным направлением ее совершенствования будет значительное улучшение характеристик по точности, надежности, расширению эксплуатационных возможностей и существенному улучшению габаритно-массовых характеристик и энергопотребления за счет внедрения новейших достижений микроэлектроники и критических технологий, использования перспективных высокостабильных материалов, микропроцессорных модулей.

Основная часть

Для создания 3D-модели датчика абсолютного давления используется программа SolidWorks с последующим расчетом в модуле Simulation [6]. Процесс создания 3D-модели датчика абсолютного давления осуществлялся на основании технического задания и пояснительной записки на конкретное изделие. В библиотеке материалов SolidWorks на этапе создания деталей вносятся все необходимые материалы с физико-механическими свойствами согласно ГОСТам, поскольку для выполнения прочностных расчетов они крайне важны. Каждой детали и сборке соответствует файл с номером и наименованием согласно конструкторской документации (КД). На рис. 2 представлены фрагменты созданной 3D-модели датчика давления в различных видах и сечениях для наглядного понимания ее конструктивных особенностей.

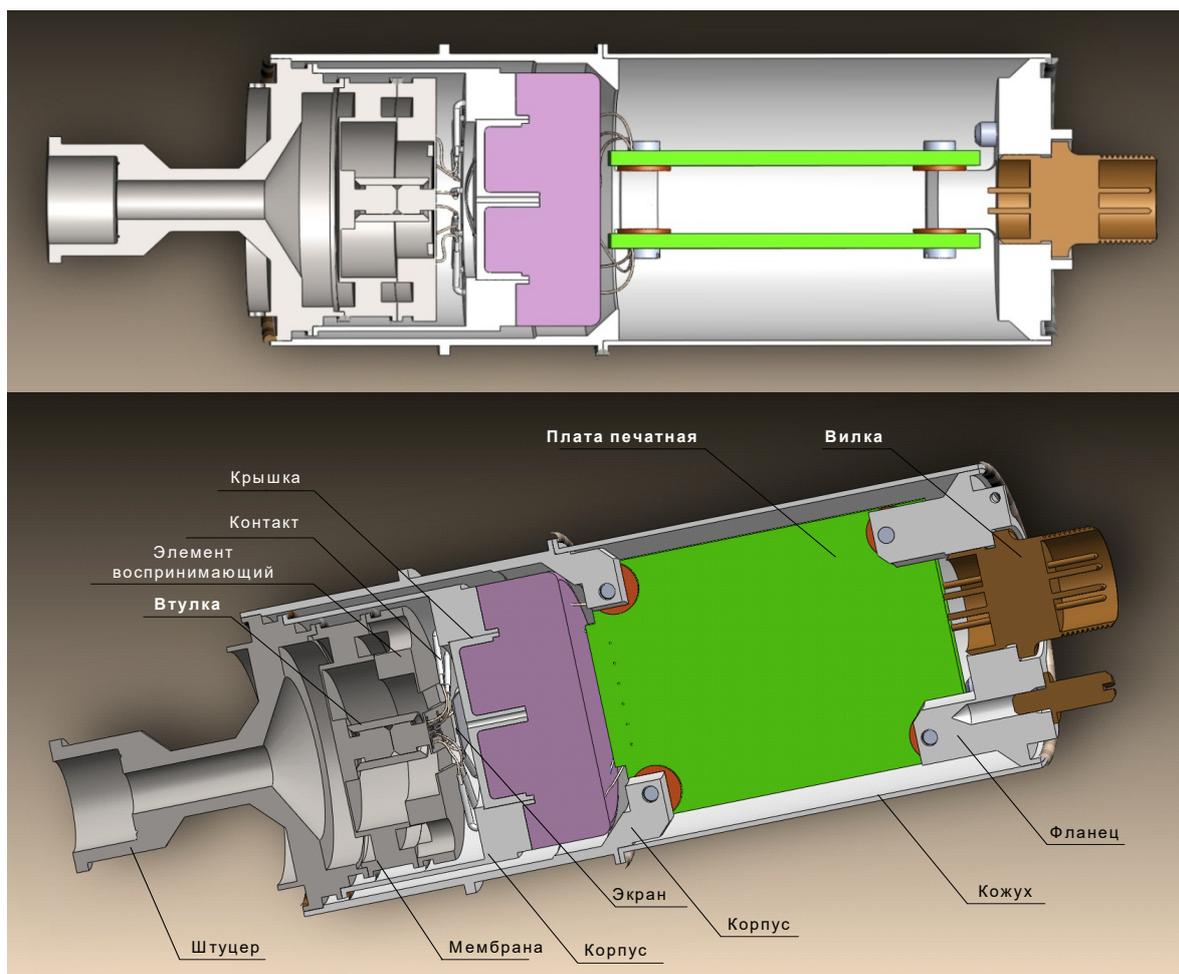


Рис. 2. 3D-модель датчика абсолютного давления в разрезе

Процесс моделирования работы датчика разделен на два этапа:

1. Расчет деформации чувствительного элемента от действующего на него давления проводится с помощью программного обеспечения SolidWorks и Ansys Workbench.
2. Расчет зависимости выходного сигнала от величины деформации чувствительного элемента производится с помощью программного обеспечения MathLab.

Объектом исследования является чувствительный элемент, моделирование которого позволяет исследовать работу датчика абсолютного давления в различных условиях эксплуатации. С помощью программного обеспечения:

- расчет деформации чувствительного элемента;
- моделирование потока жидкости в приемной полости датчика абсолютного давления;
- расчет деформации чувствительного элемента от действующего на него давления с учетом температурной нагрузки;
- расчет функциональной зависимости выходного сигнала от величины деформации чувствительного элемента.

Для выполнения расчета деформации чувствительного элемента от действующего на него давления строится сетка конечных элементов, исходя из параметров геометрической формы модели, ее размеров и места прилагаемых нагрузок. Проводится инженерный статистический анализ полученной модели в виде эпюры деформации (рис. 3), который позволяет определить значения деформаций на топологии чувствительного элемента различных диапазонов датчика абсолютного давления. Эти данные позволяют оптимизировать процесс настройки датчиков абсолютного давления. Для получения более полной информации о чувствительном элементе проводят моделирование потока жидкости в приемной полости датчика абсолютного давления. Для учета деформации от воздействия потока жидкости моделируется движение данного потока с помощью программного обеспечения SolidWorks модуля Flow Simulation (рис. 4).

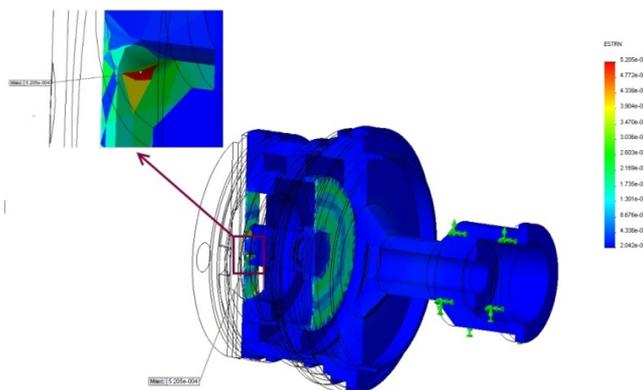


Рис. 3. Эпюра деформации чувствительного элемента датчика абсолютного давления

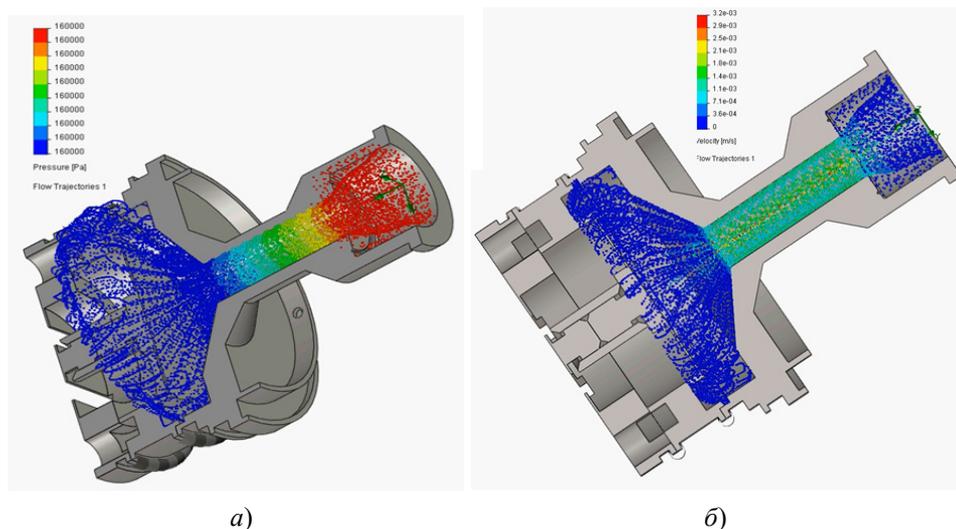


Рис. 4. Пространственное распределение динамического давления (а) и скорости потока жидкости (б) в чувствительном элементе датчика абсолютного давления

Чтобы оценить влияние потока жидкости на деформацию чувствительного элемента, необходимо импортировать данные потока, полученные в результате исследования в модуле Flow Simulation, в произведенный ранее инженерный статический анализ данной модели в модуле Simulation. В результате получаем эпюру деформации с учетом потока жидкости (рис. 5).

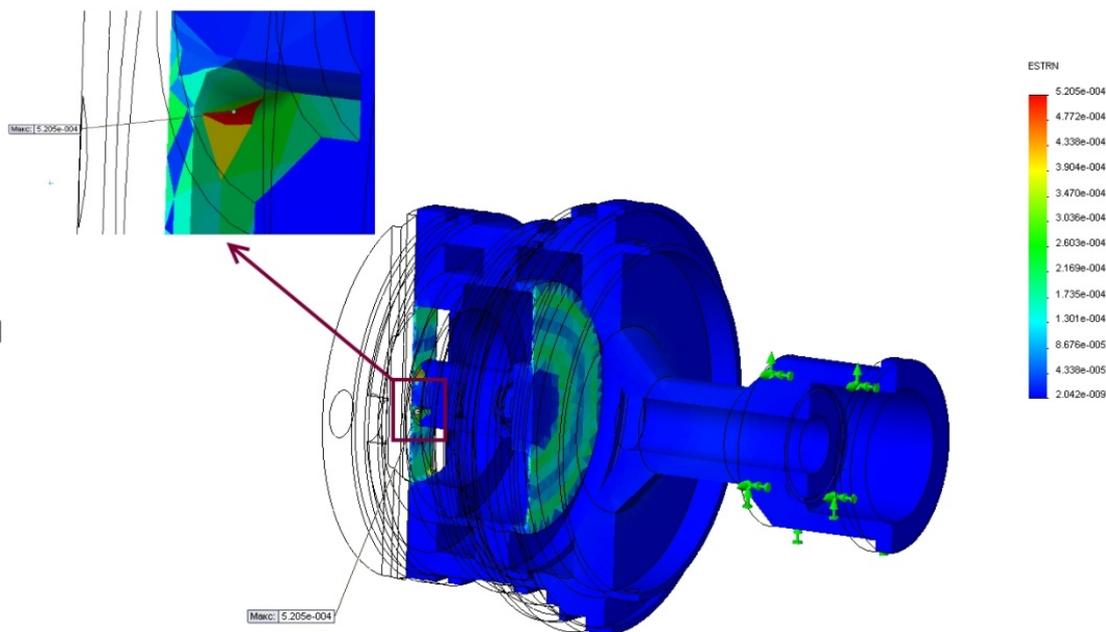


Рис. 5. Эпюра деформации с учетом потока жидкости в чувствительном элементе датчика абсолютного давления

Сравнение полученной эпюры деформации (см. рис. 5) с предыдущей (см. рис. 3) показало, что конечный результат не зависит от динамики потока жидкости.

С учетом вышеизложенного получаем эпюры напряжения, перемещения и интересующую нас деформацию топологии чувствительного элемента датчика абсолютного давления.

Результаты, полученные в ходе исследования, дают представление о том, что для получения равнозначного сигнала на выходе датчика абсолютного давления необходимо привести результаты деформаций чувствительного элемента к одному ряду значений деформации. Это позволит оптимизировать процедуру настройки датчика абсолютного давления.

Следующий пример применения моделирования – определение влияния внешних воздействующих факторов (температура от минус 196 °С и 700 °С, статическое давление 63 МПа, перегрузка статического давления 70,5 МПа и др.) на работоспособность пьезоэлектрического датчика давления [7, 8].

Для определения выбора конструкции и технологических решений пьезоэлектрического датчика давления, работающего в «жестких» условиях эксплуатации, было проведено моделирование. На рис. 6 представлена схема граничных условий внешних воздействующих факторов на пьезоэлектрический датчик давления.

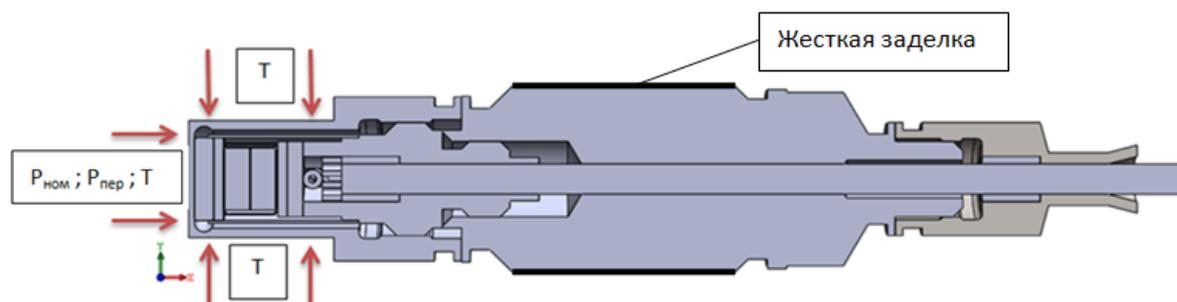


Рис. 6. Схема граничных условий

В результате моделирования воздействия статического давления величиной 63 МПа и перегрузки статического давления 70,5 МПа получены эпюры распределения напряжений, представленные на рис. 7 и 8 соответственно.

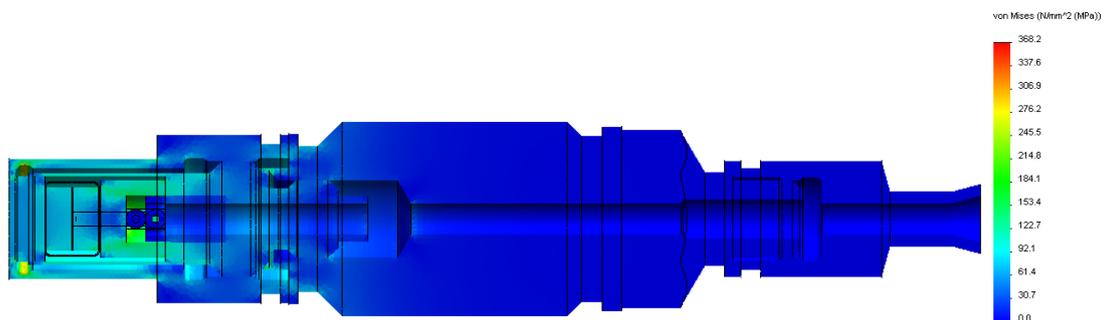


Рис. 7. Эпюра напряжений при воздействии статического давления 63 МПа

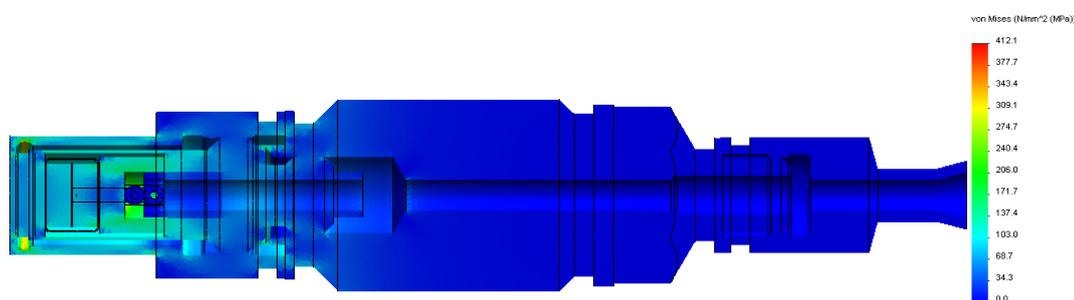


Рис. 8. Эпюра напряжений при воздействии перегрузки статического давления 70,5 МПа

Из рис. 7 и 8 видно, что максимальные напряжения, возникающие на корпусе датчика при воздействии статических давлений 63 МПа и 70,5 МПа, составляют ~ 347 и 388 МПа соответственно. Максимальные значения напряжения 369 МПа (см. рис. 7) и 413 МПа (см. рис. 8) возникают на токосъемниках. Для оценки работоспособности конструкции полученные напряжения для корпуса сравниваются с пределом текучести материала (табл. 1), а для токосъемников – с пределом прочности материала. Таким образом, коэффициент запаса прочности по пластической деформации при воздействии статических давлений 63 МПа и перегрузки статического давления 70,5 МПа для корпуса датчика из материала ХН67МВТЮ-ВД составляет 1,59 и 1,41 соответственно, а коэффициент запаса прочности по разрушению для токосъемников из материала 12Х18Н10Т – 1,63 и 1,45 соответственно.

Таблица 1

Физико-механические характеристики используемых материалов

Параметр	Материал			
	ХН67МВТЮ-ВД	12Х18Н10Т	Керамика ВК-94	ПЭСД-22
Модуль Юнга, Па	$1,9 \cdot 10^{11}$	$2,1 \cdot 10^{11}$	$2,55 \cdot 10^{11}$	$19 \cdot 10^{10}$
Коэффициент Пуассона	0,3	0,3	0,26	0,32
Плотность, кг/м ³	8360	7900	3750	2650
ТКЛР, К ⁻¹	$11,96 \cdot 10^{-6}$	$16,7 \cdot 10^{-6}$	$60 \cdot 10^{-7}$ при 200 °С; $77 \cdot 10^{-7}$ при 800 °С	$6,13 \cdot 10^{-6}$ при 25 °С; $8,0 \cdot 10^{-6}$ при 700 °С
Предел текучести	550	270	–	–
Предел прочности	930	600	–	–
Теплопроводность, Вт/(м·К)	14	16,4	13,4	1,7 при 25 °С; 1,5 при 700 °С

В результате моделирования воздействия температур минус 196 °С и 700 °С в течение 1 ч (3600 с) получены эпюры распределения температур в различные моменты времени, представленные на рис. 9.

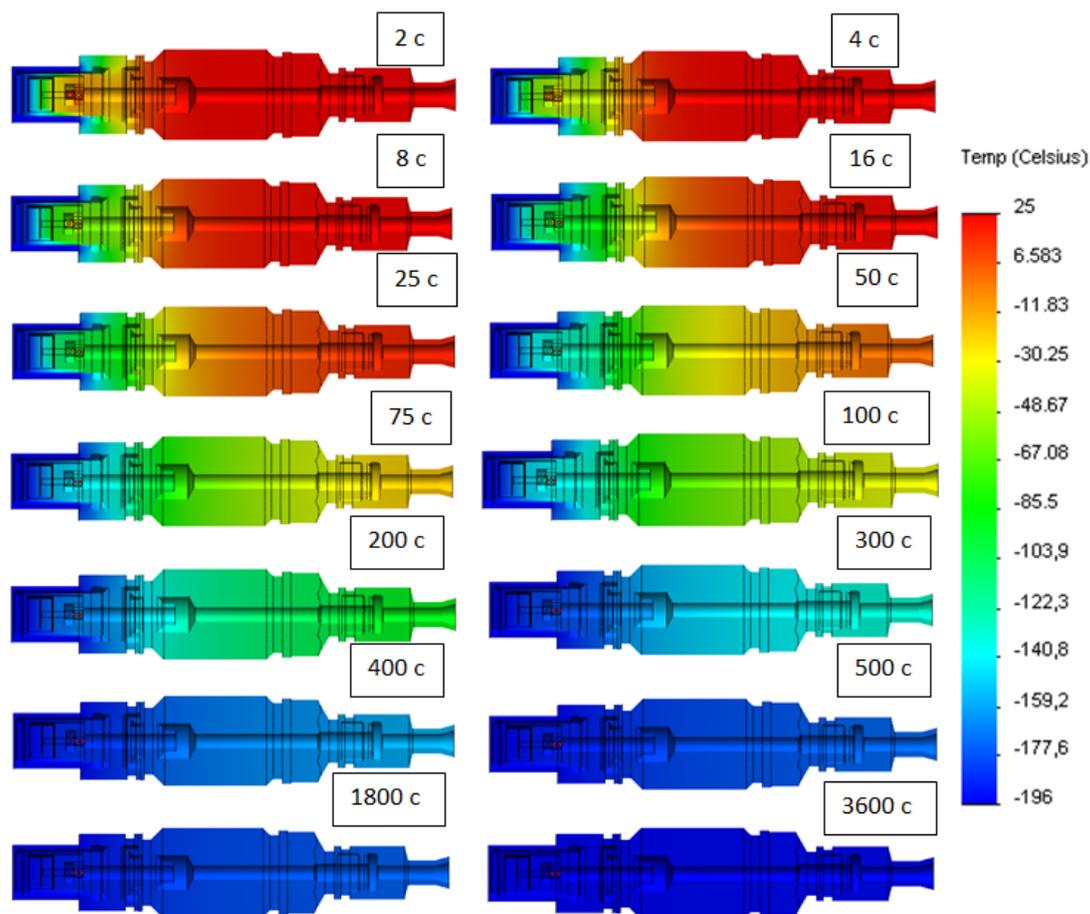


Рис. 9. Эпюры распределения температур в различные моменты времени при воздействии температуры минус 196 °С

Моделирование влияния внешних воздействующих факторов на работоспособность пьезоэлектрического датчика давления позволило определить:

- коэффициент запаса прочности по пластической деформации при воздействии статических давлений 63 МПа и давления с перегрузкой 70,5 МПа для корпуса датчика из материала ХН67МВТЮ-ВД составляет 1,59 и 1,41 соответственно;

- коэффициент запаса прочности по разрушению при воздействии статических давлений 63 МПа и давления с перегрузкой 70,5 МПа для токосъемников из материала 12Х18Н10Т – 1,63 и 1,45 соответственно;

- время полного выравнивания температурных полей (рис. 9) составило ~ 3600 с;

- при воздействии синусоидальной вибрации в направлении осей Z коэффициент запаса прочности по разрушению 2,06;

- напряжения, возникающие при воздействии механических ударов в каждом направлении, незначительны и не превышают предельно допустимого значения напряжений материала.

Проведенное моделирование подтверждает правильность заложенных конструктивных решений пьезоэлектрического датчика давлений при воздействии на него внешних воздействующих факторов для «жестких» условий эксплуатации.

Следующий пример применения моделирования – подтверждение правильности выбранных конструктивных решений и проверка соблюдения тепловых режимов эксплуатации электрорадиоизделий (ЭРИ), влияющих на работоспособность датчика линейных перемещений в условиях пониженного давления; выполнен расчет и проведено моделирование тепловых потоков, возникающих при его работе.

Конструкция датчика линейных перемещений в виде 3D-модели представлена на рис. 10, а принцип работы описан в работе [10]. По условиям эксплуатации датчик линейных перемещений должен непрерывно работать в течение 7200 с в условиях пониженного давления $1,33 \cdot 10^{-4}$ Па.

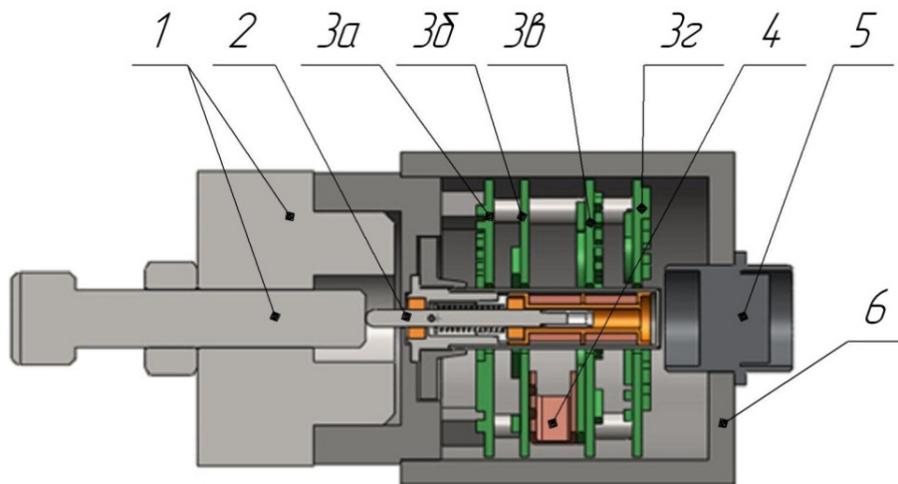


Рис. 10. 3D-модель датчика линейных перемещений:

1 – приспособление для задания перемещений; 2 – чувствительный элемент;
3а, б, в, г – платы с ЭРИ; 4 – радиатор; 5 – разъем; 6 – корпус

Для имитации работы датчика линейных перемещений была создана 3D-модель с приспособлением для задания перемещения, представленная на рис. 10. Моделирование проводилось исходя из условий эксплуатации датчика и крепления его на объекте. Начальная температура корпуса и элементов датчика линейных перемещений принята равной 20 °С.

Датчик линейных перемещений по результатам моделирования выдержал испытание на воздействие пониженного давления $1,3 \cdot 10^4$ Па, при этом дополнительная погрешность составила $\pm 0,544$ %, что говорит о его работоспособности в этих условиях. Полученные экспериментальные данные и результаты моделирования подтверждают правильность выбранных конструктивных решений, обеспечивающих его работоспособность в условиях воздействия пониженного давления.

Таким образом, подтверждена возможность определения работоспособности датчика линейных перемещений в условиях воздействия пониженного давления моделированием тепловых потоков в зависимости от рассеиваемой мощности тепловыделяющих элементов с применением программного обеспечения Solidworks и модуля FlowSimulation.

Одной из последних разработок АО «НИИФИ» с применением CALS-технологий является информационно-измерительная система (ИИС) корабельной установки, предназначенная для удаленного измерения и мониторинга динамических процессов в труднодоступных местах. Рассматриваемая ИИС состоит из автономных блоков первичного преобразования физических величин в аналоговую форму сигнала и последующего аналого-цифрового преобразования с сохранением в энергонезависимой памяти [9].

Одним из автономных модулей данной ИИС, испытывающим значительные вибрационные нагрузки и имеющим наибольшие габаритные размеры и массу по сравнению с другими модулями, является аккумуляторный модуль. Значительная масса и габаритные размеры при длительном воздействии вибрационных нагрузок в процессе эксплуатации системы могут привести к возникновению различных дефектов. Учитывая специфику геометрии конструкции аккумуляторного модуля и в целях обеспечения работоспособности в «жестких» условиях эксплуатации необходимо оценивать механическую надежность при воздействии ударов и вибрационных нагрузок.

В процессе моделирования была создана 3D-модель аккумуляторного модуля, представленная на рис. 11. Моделирование воздействия ударов и вибрационных нагрузок проводилось на базе модуля Simulation с учетом следующих физико-механических характеристик материала: плотности, модуля упругости 2-го рода, предела текучести и коэффициента Пуассона.

В результате оценки механической прочности с применением метода конечных элементов были получены эпюры максимальных напряжений, представленные на рис. 12, из которых видно, что в элементе аккумуляторного модуля максимальные напряжения, возникающие при воздействии ускорения 4000 м/с^2 в направлениях вдоль осей X и Y , составляют 423,6 и 462,7 МПа соответственно и возникают на крепежных винтах, изготовленных из материала Сталь 20, предел текучести которого составляет 250 МПа. Следовательно, условие прочности не выполняется, так как $k = 250 \text{ МПа} / 462,7 \text{ МПа} = 0,54 \geq 1,5$.

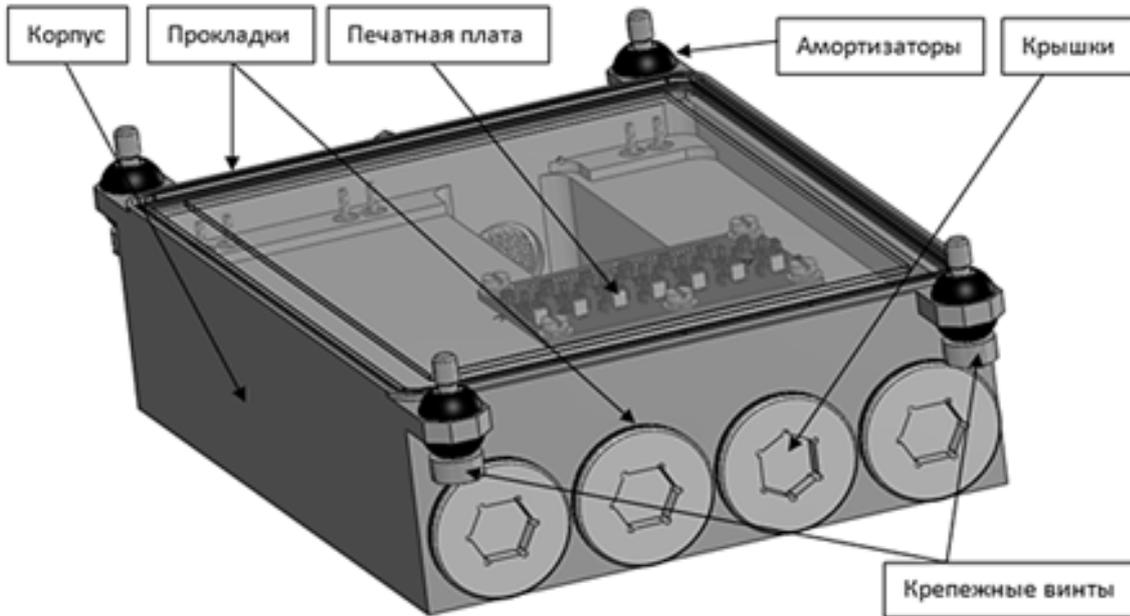


Рис. 11. 3D-модель аккумуляторного модуля

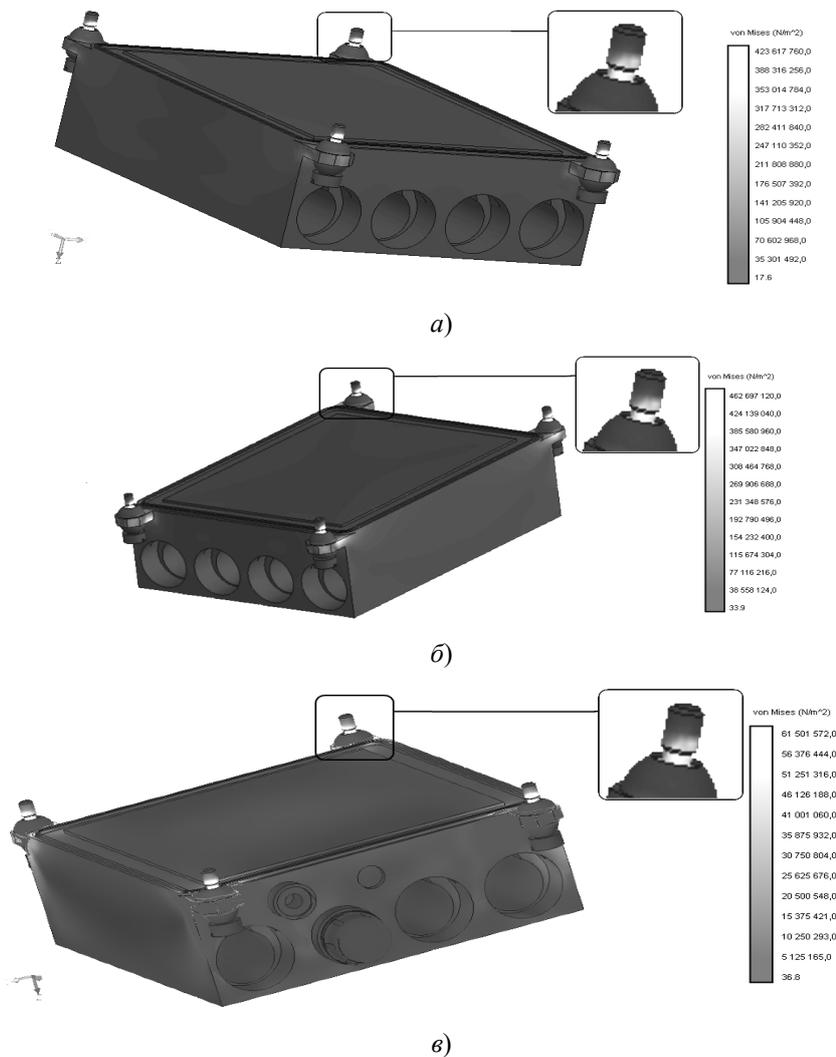


Рис. 12. Эпюра максимальных напряжений на аккумуляторном модуле при воздействии ускорения 4000 м/с^2 , направленного вдоль оси X (а), оси Y (б) и оси Z (в)

Экспериментальные данные по результатам испытаний на надежность аккумуляторного модуля ИИС подтвердили расчетные значения вероятности безотказной работы в условиях внешних воздействующих факторов.

Пример моделирования работы многоканального измерительного преобразователя с датчиками абсолютного давления с помощью программного обеспечения Electronics Workbench представлен на рис. 13.

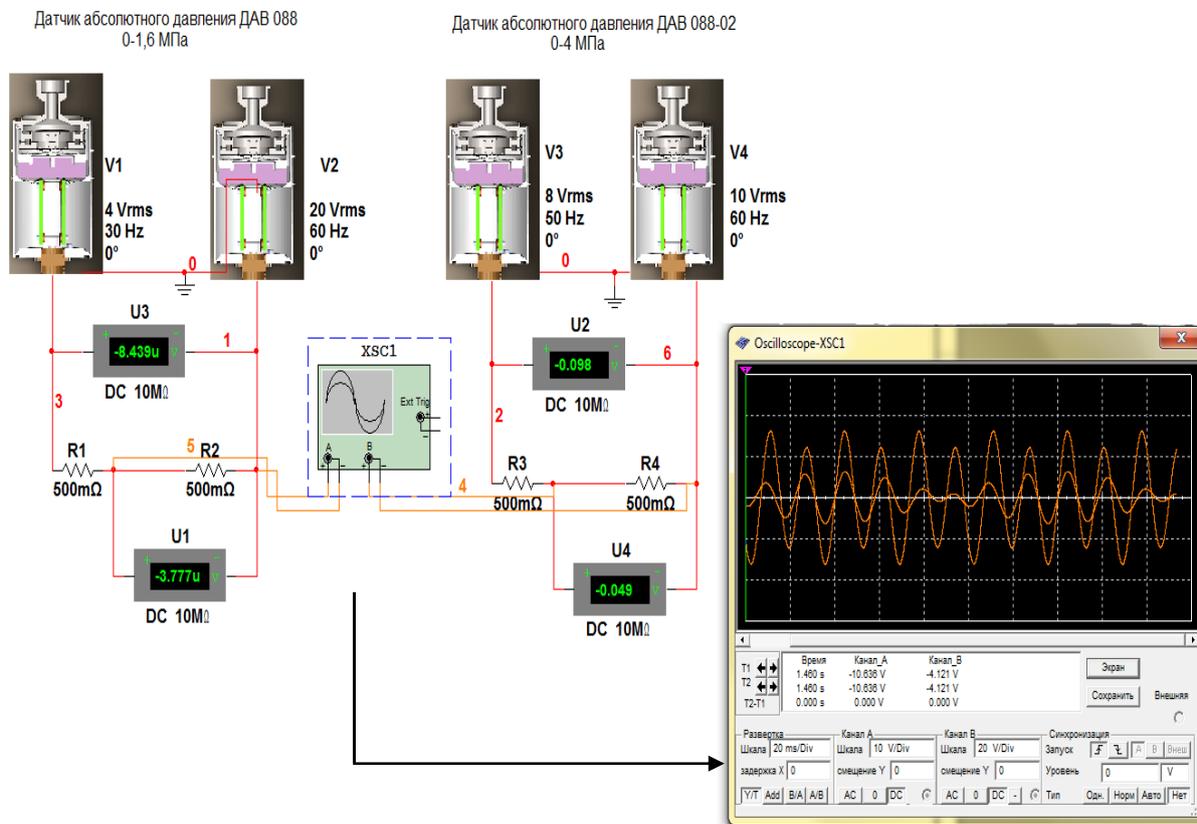


Рис. 13. Электрическая схема многоканального измерительного преобразователя с датчиками абсолютного давления в Electronics Workbench

Заключение

Методы CALS-технологий носят универсальный характер и применяются для моделирования широкой номенклатуры датчиков-преобразующей аппаратуры и систем.

Применение программного обеспечения Simulation, SolidWorks, Ansys Workbench, Simulink, Matlab, Electronics Workbench, эмпирического моделирования и CALS-технологий позволяет существенно сократить сроки разработки, повысить качество, надежность и выпускать современную конкурентоспособную датчиков-преобразующую аппаратуру и системы на ее основе [10].

Библиографический список

1. Ушаков, Д. М. Введение в математические основы САПР : курс лекций / Д. М. Ушаков. – Москва : ДМК Пресс, 2010. – 192 с.
2. Большаков, В. П. Твердотельное моделирование деталей в CAD-системах : AutoCAD, КОМПАС-3D, SolidWorks, Inventor, Creo / В. П. Большаков, А. Л. Бочков, Ю. Т. Лячек. – Санкт-Петербург : Питер, 2015. – 480 с.
3. ГОСТ 23501.108-85 Системы автоматизированного проектирования. Классификация и обозначения. – Москва : Государственный комитет СССР по стандартам, 1986. – 16 с.
4. Элементы концепции построения интеллектуальных систем мониторинга и контроля изделий ракетно-космической техники и объектов наземно-космической инфраструктуры / А. Г. Дмитриенко, А. В. Николаев, А. В. Ляшенко, М. В. Тюрин, Д. А. Ярославцева // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2018. – № 2 (24). – С. 5–13.

5. Направления развития базовых технологий создания перспективных датчиков физических величин / И. В. Волохов, Е. В. Ефремов, В. В. Корнев, С. И. Торгашин, А. В. Федулов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего. – 2012. – № 04. – С. 27–40.
6. Мусаев, Р. Ш. Расчет чувствительного элемента датчика абсолютного давления методом конечных элементов / Р. Ш. Мусаев, М. А. Фролов // Датчики и системы. – 2012. – № 9 (160). – С. 32–33.
7. Имитационное моделирование пьезоэлектрического датчика давления / К. И. Баstryгин, А. А. Трофимов, А. С. Баранов, А. А. Громова, П. Н. Ефимов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 1 (19). – С. 20–28.
8. Трофимов, А. А. Моделирование воздействия пониженного давления на датчик линейных перемещений / А. А. Трофимов, Д. А. Рязанцев, Р. М. Тимонин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 3 (21). – С. 67–73.
9. Фролов, М. А. Оценка механической надежности дополнительного аккумуляторного модуля информационно-измерительной системы / М. А. Фролов, А. В. Салмин, Р. Ш. Мусаев // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 4 (18). – С. 47–51.
10. Дмитриенко, А. Г. Центр проектирования унифицированных датчиков для работы в особо жестких условиях эксплуатации / А. Г. Дмитриенко, А. В. Блинов, И. Н. Баринов, Р. Ш. Мусаев // Датчики и системы. – 2012. – № 10 (161). – С. 42–44.

References

1. Ushakov D. M. *Vvedenie v matematicheskie osnovy SAPR: kurs lektsiy* [Introduction to the mathematical foundations of CAD : lectures]. Moscow: DMK Press, 2010, 192 p. [In Russian]
2. Bol'shakov V. P., Bochkov A. L., Lyachek Yu. T. *Tverdotel'noe modelirovanie detaley v CAD-sistemakh: AutoCAD, KOMPAS-3D, SolidWorks, Inventor, Creo* [Solid modeling of parts in CAD systems : AutoCAD, COMPASS-3D, SolidWorks, Inventor, Creo]. Saint-Petersburg: Piter, 2015, 480 p. [In Russian]
3. *GOST 23501.108-85 Sistemy avtomatizirovannogo proektirovaniya. Klassifikatsiya i oboznacheniya* [GOST 23501.108-85 Computer aided design. Classification and designation of]. Moscow: Gosudarstvennyy komitet SSSR po standartam, 1986, 16 p. [In Russian]
4. Dmitrienko A. G., Nikolaev A. V., Lyashenko A. V., Tyurin M. V., Yaroslavtseva D. A. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2018, no. 2 (24), pp. 5–13. [In Russian]
5. Volokhov I. V., Efremov E. V., Kornev V. V., Torgashin S. I., Fedulov A. V. *XXI vek: itogi proshlogo i problema nastoyashchego* [XXI century: the past and the present]. 2012, no. 04, pp. 27–40. [In Russian]
6. Musaev R. Sh., Frolov M. A. *Datchiki i sistemy* [Sensors and systems]. 2012, no. 9 (160), pp. 32–33. [In Russian]
7. Bastrygin K. I., Trofimov A. A., Baranov A. S., Gromova A. A., Efimov P. N. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2017, no. 1 (19), pp. 20–28. [In Russian]
8. Trofimov A. A., Ryazantsev D. A., Timonin R. M. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2017, no. 3 (21), pp. 67–73. [In Russian]
9. Frolov M. A., Salmin A. V., Musaev R. Sh. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2016, no. 4 (18), pp. 47–51. [In Russian]
10. Dmitrienko A. G., Blinov A. V., Barinov I. N., Musaev R. Sh. *Datchiki i sistemy* [Sensors and systems]. 2012, no. 10 (161), pp. 42–44. [In Russian]

Мусаев Руслан Шабанович

кандидат технических наук,
заместитель генерального директора –
главный конструктор,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: info@niifi.ru

Ляшенко Антон Валерьевич

кандидат технических наук,
начальник конструкторского бюро,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: info@niifi.ru

Musaev Ruslan Shabanovich

candidate of technical sciences,
deputy general director – chief designer,
Scientific Research Institute
of Physical Measurements
(440026, 8/10, Volodarskogo street, Penza, Russia)

Lyashenko Anton Valerjevich

candidate of technical sciences,
head of design engineering department,
Scientific Research Institute
of Physical Measurements
(440026, 8/10, Volodarskogo street, Penza, Russia)

Тюрин Михаил Владимирович

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: info@niifi.ru

Ярославцева Дарья Александровна

аспирант,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40);
инженер-конструктор,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: levik_92@mail.ru

Tyurin Mihail Vladimirovich

candidate of technical sciences, senior researcher,
Scientific Research Institute
of Physical Measurements
(440026, 8/10, Volodarskogo street, Penza, Russia)

Yaroslavtseva Daria Aleksandrovna

postgraduate student,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia);
design engineer,
Scientific Research Institute
of Physical Measurements
(440026, 8/10, Volodarskogo street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Мусаев, Р. Ш. Применение cals-технологий и систем автоматизированного проектирования при создании датчиков-преобразующей аппаратуры и систем для ракетно-космической техники и наземной космической инфраструктуры / Р. Ш. Мусаев, А. В. Ляшенко, М. В. Тюрин, Д. А. Ярославцева // Надежность и качество сложных систем. – 2019. – № 2 (26). – С. 91–102. – DOI 10.21685/2307-4205-2019-2-11.

В. С. Михайлов, Н. К. Юрков

ЧАСТНЫЙ СЛУЧАЙ НАХОЖДЕНИЯ ЭФФЕКТИВНЫХ ОЦЕНОК

V. S. Mikhaylov, N. K. Yurkov

A SPECIAL CASE OF FINDING EFFECTIVE ESTIMATES

Аннотация. Актуальность и цели. За последние несколько лет была проделана большая работа по повышению эффективности оценок показателей надежности для различных планов испытаний, причем особое внимание уделялось испытаниям, не давшим отказы. В этих работах полученные оценки сравнивались по эффективности. Кроме этого, к оценкам для безотказных испытаний предъявлялись определенные требования к результату оценивания показателя надежности: быть монотонными с ростом числа отказов и отличными от нуля и единицы. Казалось, что полученные оценки значительно улучшить не возможно. Однако в некоторых случаях это не так. Целью работы является повышение эффективности оценок вероятности безотказной работы для биномиального плана испытаний в случае испытаний, не давших отказов. **Материалы и методы.** В основе исследования эффективных оценок лежит интегральный подход, базирующийся на построении правила выбора (критерий) эффективной оценки $\hat{\theta}_0(n; r)$, заданного на сумме значений абсолютных (или относительных) смещений оценок $\hat{\theta}(n; r)$, выбранных из некоторого множества, от параметра закона распределения, где n – количество изделий, первоначально выставленных на испытания. **Результаты и выводы.** 1. В результате проведенных исследований удалось получить: оценки ВБР \hat{p} и \hat{v} более эффективные в сравнении с ранее предложенными; оценку СНДО $\hat{T}_1 = \frac{\tau}{-\ln(1 - \tilde{v}(R=0, N, \gamma=0, 6))}$, эффективную на достаточно широком классе оценок и более эффективную в сравнении с ранее предложенными. 2. Полученные оценки \hat{p} и \hat{v} , близкие к эффективной, и оценка \hat{T}_1 , эффективная на достаточно широком классе оценок, предлагаются к использованию для безотказных испытаний, проводимых по биномиальному плану. 3. Для биномиального плана и плана испытаний с восстановлением и ограниченным временем испытаний, оценки ВБР $1 - \tilde{v}$ и $\hat{P}_{NB\tau}(t)$, оценки СНДО \hat{T}_1 и \hat{T}_{01} приблизительно равны между собой для случая, когда в процессе испытаний отказы не возникали, что и следовало ожидать. Выбор, какие

Abstract. Background. Over the past few years, a lot of work has been done to improve the effectiveness of evaluations of reliability indicators for various test plans, with particular attention being paid to failing tests. In these papers, the estimates obtained were compared in terms of effectiveness. In addition to the estimates for trouble-free tests, there were certain requirements for the result of evaluating the reliability index: to be monotonous with an increase in the number of failures and different from zero and one. It seemed that the estimates obtained could not be significantly improved. However, in some cases it is not. The aim of the work is to increase the efficiency of estimates of the probability of failure-free operation for a binomial test plan in the case of tests that did not give failures. **Materials and methods.** The study of effective estimates is based on an integral approach based on the construction of a selection rule (criterion) for an effective estimate of $\hat{\theta}_0(n; r)$ given on the sum of the values of absolute (or relative) displacements of estimates $\hat{\theta}(n; r)$ selected sets, on the parameter of the distribution law, where n is the number of products initially put up for testing. **Results and conclusions.** 1. As a result of the research, it was possible to obtain: estimates \hat{p} and \hat{v} are more effective than previously proposed ones; assessment $\hat{T}_1 = \frac{\tau}{-\ln(1 - \tilde{v}(R=0, N, \gamma=0, 6))}$ effective on a fairly wide class of estimates and more effective in comparison with the previously proposed. 2. The obtained estimates of \hat{p} and \hat{v} , which are close to the effective one, and the estimate \hat{T}_1 , effective on a fairly wide class of estimates, are proposed for use for reliable tests carried out according to the binomial plan. 3. For a binomial plan and a test plan with recovery and limited test time, estimates of the probability of failure-free operation $1 - \tilde{v}$ and $\hat{P}_{NB\tau}(t)$, estimates \hat{T}_1 and \hat{T}_{01} are approximately equal to each other when failures did not occur during the test, which was to be expected. The choice of what grades to use in this case remains with the tester.

оценки следует использовать в этом случае, остается за испытателем.

Ключевые слова: схема Бернулли; биномиальный план испытаний; точечная оценка; вероятность отказа; вероятность безотказной работы; эффективная оценка.

Keywords: the Bernoulli scheme; test plan; point estimation; the probability of failure; probability of failure-free operation; effective of assessment.

Введение

За последние несколько лет была проделана большая работа по повышению эффективности оценок показателей надежности для различных планов испытаний, причем особое внимание уделялось испытаниям, не давшим отказы [1–5]. В этих работах полученные оценки сравнивались по эффективности. Кроме этого, к оценкам для безотказных испытаний предъявлялись определенные требования к результату оценивания показателя надежности: быть монотонными с ростом числа отказов и отличными от нуля и единицы для оценок ВБР (далее – ВБР). Казалось, что полученные оценки значительно улучшить невозможно. Однако в некоторых случаях это не так.

Цель работы

Целью работы является повышение эффективности оценок вероятности безотказной работы для биномиального плана испытаний в случае, когда испытания заканчиваются без появления отказов.

Новые понятия

Введем новое понятие, а именно: пусть оценка вероятности отказа p биномиального плана испытаний (далее – \hat{v}) центрирует вероятностную функцию ($P_{n\Sigma R} = \sum_r P_n(r)$, где $P_n(r)$ – вероятность возникновения $R=r$ отказов) относительно предельных границ изменения ее значений [4–5]. Это означает, что каждый из случайных интервалов $[0; \hat{v}]$ и $[\hat{v}; 1]$, чьи совместные границы равны значениям этой оценки, с вероятностью равной 0,5 накрывают оцениваемый параметр p . Такие оценки будем называть центрируемыми, т.е. центрируемая оценка \hat{v} находится из выражения $P_{n\Sigma R} = \sum_r P_n(r) = 0,5$.

Заметим, что центрируемые оценки для некоторых планов испытаний близки к эффективным оценкам [4, 5].

Из определения центрируемой оценки следует, что она определяет нижнюю (верхнюю) доверительную границу (далее – НДГ (ВДГ)) случайного интервала для неизвестного параметра p при доверительной вероятности $\gamma = 0,5$ (или уровне значимости $\alpha = 1 - \gamma = 0,5$). При этом сам доверительный интервал называют центральным [7]. С другой стороны, непосредственно НДГ (ВДГ) случайного интервала для неизвестного параметра p можно трактовать как точечную оценку параметра p с сильным смещением вниз (вверх). НДГ (далее – \hat{p}_n) (ВДГ (далее – \hat{p}_b)) интервала неизвестного параметра p с доверительной вероятностью $\gamma = 1 - \alpha$ вычисляют по формулам (случай монотонного убывания) [7, 8]:

$$P_{n\Sigma R} = \sum_r P_n(r, \hat{p}_n) = \gamma;$$

$$P_{n\Sigma R} = \sum_r P_n(r, \hat{p}_b) = \alpha.$$

Для того, чтобы решение этого уравнения существовало и было единственным, необходимо проверять монотонность $P_{n\Sigma R}$ относительно переменной p для различных планов испытаний [6, 7]. В случае монотонного возрастания вероятностной функции $P_{n\Sigma R}$ неизвестные параметры уравнений \hat{p}_n и \hat{p}_b меняются местами в уравнениях [7].

Если полученный интервал $(\hat{p}_в и \hat{p}_н)$ свести в точку, то доверительные границы этого интервала совпадут, т.е. $\hat{p}_в$ станет равной $\hat{p}_н$. Что определит точечную оценку $\hat{v} = \hat{p}_в = \hat{p}_н$. Такой результат возможен в единственном случае, когда $\gamma = \alpha = 1 - \gamma = 0,5$, что определяет единственность оценки \hat{v} .

В основе изучения центрируемых оценок лежит традиционный метод исследования.

Методы исследования оценок показателей надежности

В основе исследования эффективных оценок лежит интегральный подход, сформулированный в работах [1–5]. В основе интегрального подхода лежит построение правила выбора (критерий) эффективной оценки $\hat{\theta}_0(n; R)$, заданного на сумме значений абсолютных (или относительных) смещений оценок $\hat{\theta}(n; R)$, выбранных из некоторого множества, от параметра закона распределения, где n – количество изделий, первоначально выставленных на испытания.

Критерий выбора эффективной оценки для ВБР

Критерий выбора эффективной оценки вероятности отказа (или ВБР) на множестве оценок $\hat{\theta}(n; R)$ основан на суммарном квадрате абсолютных смещений математического ожидания оценок $E\hat{\theta}(n; R)$ от вероятности отказа p для всех возможных значений p, n .

Для выбора эффективной оценки вероятности отказа (или ВБР) потребуется только понятие абсолютно эффективной оценки и ограничение на изменение параметра p в пределах $1 \leq p \leq 0$. Поэтому для простоты в качестве критерия получения эффективной оценки $\hat{\theta}_0(n; R)$ строится функционал (далее – $L(\hat{\theta}(n; R))$) на ограниченном множестве $n_1 \leq n_i \leq n_k, i = 1, \dots, k$ [4–5]:

$$L(\hat{\theta}(n; R)) = \frac{1}{k} \sum_{n_1}^{n_k} \int_0^1 \{E\hat{\theta}(n_i; R) - p\}^2 dp. \quad (1)$$

Оценка $\hat{\theta}_0(n; R)$, минимизирующая функционал $L(\hat{\theta}(n; R))$ на заданном множестве оценок, называется эффективной оценкой по смещению на заданном множестве смещенных оценок. Среди оценок, доставляющих примерно один и тот же минимум функционалу $L(\hat{\theta}(n; R))$, следует выбрать оценку, которая имеет минимальное уклонение в среднеквадратическом смысле (классическое определение эффективной оценки [6]). Данную оценку будем называть как более эффективную в сравнении с выбранными.

Для выбора оценок, обладающих минимальным уклонением, строится функционал (далее – $D(\hat{\theta}(n; R))$), основанный на суммировании математических ожиданий квадратов относительных уклонений оценок $\hat{\theta}(n; R)$ от параметра p для всех возможных значений p, n [4–5]:

$$D(\hat{\theta}(n; R)) = \frac{1}{k} \sum_{n_1}^{n_k} \int_0^1 E\{\hat{\theta}(n_i; R) - p\}^2 dp. \quad (2)$$

Оценку, которая доставляет нуль функционалу $L(\hat{\theta}_0(n; R)) = 0$ (несмещенная оценка) и минимум функционалу $D(\hat{\theta}_0(n; R))$, будем называть абсолютно эффективной.

Новые подходы к улучшению эффективности оценок (частный случай)

Заметим, что центрируемые оценки близки по своей эффективности к лучшим оценкам [5] и что, несмотря на оптимистическое определение центрируемой оценки \hat{v} , эта оценка является смещенной относительно оцениваемого параметра $L(\hat{v}(n; R)) > 0$. Однако это смещение можно умень-

шить, а значит, и улучшить эффективность. Для этого достаточно минимизировать функционал $L(\tilde{v}(n; R))$, варьируя величиной вероятности $0,5 + x$ в выражении $P_{n\Sigma R} = \sum_r P_n(r, \tilde{v}) = 0,5 + x$, где x – некоторое вещественное число. Полученная таким образом оценка уже не является центрируемой, но имеет меньшее смещение в сравнении с центрируемой оценкой \hat{v} . А следовательно, от оценки \tilde{v} можно ожидать и большую эффективность.

Наиболее интересными для практики являются биномиальные испытания и испытания с ограниченной продолжительностью и восстановлением отказавших изделий.

Биномиальный план испытаний. Нахождение оценки ВБР близкой к эффективной

Пусть случайная величина R имеет биномиальное распределение $p_n(r)$ [7, ф. 1.4.55] с параметрами n и $p, 0 \leq p \leq 1$, т.е. с.в. R , равная числу успехов в серии из n независимых опытов с вероятностью успеха p , принимает целочисленные значения $0, 1, 2, \dots, n$ с вероятностями

$$p_n(r) = C_n^r p^r (1 - p)^{n-r}.$$

Математическое ожидание $E\hat{\theta}(R, n)$ имеет вид

$$E\hat{\theta}(R, n) = \sum_{r=0}^n p_n(r) \hat{\theta}(r, n).$$

Ограничим объем испытаний $0 < n \leq 10$, что для высоконадежных и сложных изделий является пределом затрат. Тогда формула (1) примет вид

$$L(\hat{\theta}(n; R)) = \frac{1}{10} \sum_{n_1=1}^{n_0=10} \int_0^1 \{E\hat{\theta}(n_i; R) - p\}^2 \partial p.$$

А формула (2) примет вид

$$D(\hat{\theta}(n; R)) = \frac{1}{10} \sum_{n_1=1}^{n_0=10} \int_0^1 E\{\hat{\theta}(n_i; R) - p\}^2 \partial p.$$

Заметим, что функция вероятности биномиального плана испытаний $P_{n\Sigma R}$ монотонно убывает с ростом p [7], а следовательно, уравнение

$$P_{n\Sigma R=r} = \sum_{k=0}^r P_n(k, \tilde{v}) = 0,5 + x \tag{3}$$

имеет единственное решение. Расчеты показывают, что оценке \tilde{v} , минимизирующей функционал $L(\tilde{v}(n; R))$, соответствует вероятность $0,5 + x = 0,86$.

В табл. 1 приведены результаты подстановки в функционалы $L(\hat{\theta}(n; R))$ и $D(\hat{\theta}(n; R))$ в соответствии с формулами (1) – (3), следующих оценок вероятности отказа $\hat{\theta}$: $\bar{p} = \frac{R}{n}, \hat{v}, \tilde{v}, \hat{p}, \tilde{p}$ [5] и

$$p = \frac{R+1}{n+2}, \text{ где}$$

$$\hat{p} = \begin{cases} \hat{v}(0, n), & R = 0, \\ \frac{R}{n}, & R > 0, \end{cases} \quad \tilde{p} = \begin{cases} \tilde{v}(0, n), & R = 0, \\ \frac{R}{n}, & R > 0. \end{cases}$$

Вычисления функционалов $L(\hat{\theta}(n; R))$ и $D(\hat{\theta}(n; R))$ проводились с шагом $\partial p = 1E - 03$. А вычисления неявно заданных оценок \tilde{v} и \hat{v} проводились с точностью $1E - 04$.

Таблица 1

Результаты подстановки предложенных оценок вероятности отказа в функционалы $L(\hat{\theta}(n; R))$ и $D(\hat{\theta}(n; R))$

Вид функционала	\hat{v} $\gamma = 0,5$	\tilde{v} $\gamma = 0,86$	\hat{p}	\tilde{p}	$\bar{p} = \frac{R+1}{n+2}$	$\bar{p} = \frac{R}{n}$
$L(\hat{\theta}(n; R))$	0,0176	0,0058	0,0112	0,0008	0,0104	6E-33
$D(\hat{\theta}(n; R))$	0,0446	0,0490	0,0401	0,0439	0,0266	0,0488

Из табл. 1 следует, что составная оценка \tilde{p} , построенная на основе оценки \tilde{v} и классической (несмещенной) оценки $\frac{R}{n}$, обладает минимальным смещением из всех предложенных оценок (за исключением несмещенной и эффективной оценки $\bar{p} = \frac{R}{n}$). Как и следовало ожидать, оценка $\tilde{v}(\gamma = 0,86)$ обладает минимальным смещением в сравнении с центрируемой оценкой $\hat{v}(\gamma = 0,5)$.

Из табл. 1 также следует, что оценки \hat{p} и \tilde{p} примерно равносильны по уклонению своих значений от параметра p и незначительно уступают в этом качестве оценкам \tilde{v} и \hat{v} . Поэтому оценку \tilde{p} можно принять в качестве искомой эффективной оценки среди предложенных, не считая оценку $\bar{p} = \frac{R}{n}$.

Заметим, что при вычислениях варьирование шагом и диапазоном суммирования приводит к изменению результата функционала, но не меняет сути вещей – результат сравнения оценок не меняется.

Несмещенная и эффективная оценка $\bar{p} = \frac{R}{n}$ биномиального плана испытаний обладает минимальной дисперсией (разбросом своих значений) среди несмещенных оценок [6, 7]. Однако всегда можно найти смещенную оценку, обладающую меньшим разбросом своих значений (и это с учетом смещения) в сравнении с несмещенными оценками, что и отражено в табл. 1. Несмещенная и эффективная оценка $\bar{p} = \frac{R}{n}$ незначительно проигрывает по разбросу своих значений среди предложенных оценок (см. табл. 1).

Оценка $\bar{p} = \frac{R+1}{n+2}$ приведена для сравнения (см. табл. 1), так как обладает свойствами, близкими по эффективности к лучшим оценкам ($\tilde{v}(\gamma = 0,86)$ и $\tilde{p}(\gamma = 0,86)$) и даже превосходит некоторые из них ($\hat{v}(\gamma = 0,5)$ и $\hat{p}(\gamma = 0,5)$). Кроме того, оценка \bar{p} обладает наименьшим разбросом своих значений в сравнении с представленными оценками.

Оценка $\bar{p} = \frac{R+1}{n+2}$ является байесовской оценкой и представляет тривиальный случай. Чтобы получить оценку \bar{p} , для этого следует предположить, что величина параметра p равномерно распределена в интервале $[0;1]$. Это допущение соответствует полному отсутствию данных о надежности изделия, т.е. максимальной неопределенности относительно интервала значений параметра p .

Плотность равномерного з.р. параметра p на отрезке $p = t \in [t_1, t_2]$ имеет вид

$$q(t) = \frac{1}{t_2 - t_1}. \tag{4}$$

Суть байесовского подхода состоит в том, что неизвестный (оцениваемый) параметр p рассматривается как случайная величина (далее – с.в.) с некоторой плотностью распределения $q(t)$, где t – реализация с.в. p [6, 9]. Плотность $q(t)$ называется априорной, т.е. данной до эксперимента. Байесовский подход предполагает, что неизвестный параметр p был выбран случайным образом из распределения с плотностью $q(t)$. Тогда совместная плотность распределения выражается формулой $f(R=r, p=t) = f(r|p=t)q(t)$.

В соответствии с формулой Байеса условная плотность апостериорного распределения (после эксперимента) примет вид [6]

$$q(t|R=r) = \frac{f(r|p=t)q(t)}{f(r)}, \tag{5}$$

где $f(r) = \int f(r|p=t)q(t)dt$. Само апостериорное распределение параметра p будем обозначать через Q_r . Тогда байесовская оценка, соответствующая априорному распределению Q с плотностью $q(t)$, имеет вид

$$\hat{\theta}_Q(R) = E(p|R) = \int tq(t|R)dt = \int tQ_r(dt). \tag{6}$$

В силу свойств условного математического ожидания байесовская оценка минимизирует среднеквадратическое отклонение $E(\hat{\theta}_Q(R) - p)^2$. Или для сравнения байесовской оценки на множестве других оценок $\hat{\theta}(R)$ выполняется неравенство

$$E(\hat{\theta}_Q(R) - p)^2 \leq E(\hat{\theta}(R) - p)^2 = \int E_t(\hat{\theta}(R) - t)^2 q(t) dt. \tag{7}$$

Отметим еще раз, что для байесовской оценки безусловное среднеквадратическое отклонение (см. формулу (7))

$$E(\hat{\theta}_Q(R) - p)^2 = \int E_t(\hat{\theta}_Q(R) - t)^2 q(t) dt \tag{8}$$

принимает наименьшее возможное значение. Соотношение (8) показывает, что байесовская оценка минимизирует среднее значение. Недостатком байесовского подхода является обязательное знание плотности априорного з.р. случайного параметра p (см. формулы (5)–(8)). С одной стороны, эти, заложенные в правило, предварительные знания несут в себе однократные финансовые издержки, а с другой – позволяют минимизировать объем испытаний [9], что в рамках стабильного производства дает им конкурентные преимущества.

Плотность совместного распределения случайных величин параметра p и R для биномиальных испытаний выражается формулой ($t_2 = 1, t_1 = 0$):

$$f(R=r, p=t) = f(r|p=t)q(t) = \frac{1}{t_2 - t_1} C_n^r t^r (1-t)^{n-r}.$$

Тогда в соответствии с формулой (5)

$$f(r) = \int f(r|p=t)q(t)dt = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_0^1 C_n^r t^r (1-t)^{n-r} dt.$$

Условная плотность апостериорного распределения для биномиального плана испытаний примет вид

$$q(t|R=r) = \frac{f(r|p=t)q(t)}{f(r)} = \frac{t^r (1-t)^{n-r}}{\int_0^1 t^r (1-t)^{n-r} dt}.$$

Учтем, что $\int_0^1 t^r (1-t)^{n-r} dt = \frac{\Gamma(R+1)\Gamma(N-R+1)}{\Gamma(N+2)}$ [7, ф. (1.4.35)], тогда условная плотность апостериорного распределения для биномиального плана испытаний подобна плотности бета-распределения с параметрами $p=t, a=R+1, b=N-R+1$, а именно [7, ф. (1.4.31)]:

$$q(t | R=r) = f_p(t, R+1, N-R+1) = \frac{\Gamma(N+2)}{\Gamma(R+1)\Gamma(N-R+1)} t^r (1-t)^{n-r}.$$

Для бета-распределения с параметрами $a=R+1, b=N-R+1$ математическое ожидание для случайного параметра p выражается через ее параметры a и b по формуле [7, ф. (1.4.37)]:

$$M(p) = \frac{a}{a+b} = \frac{R+1}{N+2}.$$

Заметим, что $M(p)$ является апостериорной оценкой параметра p , т.е. $\bar{p}(R, N) = \frac{R+1}{N+2}$.

В случае байесовского оценивания оценка $\bar{p}(R, N)$ является тривиальной. Однако в случае полного отсутствия данных о надежности изделий оценка $\bar{p}(R, N)$ является хорошим инструментом исследователя. Несмотря на свою простоту, оценка $\bar{p}(R, N)$ является близкой по своей эффективности к лучшим оценкам, предназначенным для безотказных испытаний, проводимых по схеме Бернулли (плану биномиальных испытаний) (см. табл. 1).

Биномиальный план испытаний. Нахождение эффективной оценки средней наработки до отказа

Будем считать, что наработка до отказа изделий подчиняется экспоненциальному закону распределения вероятностей (далее – з.р.) с параметром T_0 , где последний совпадает со средней наработкой до отказа (далее – СНДО). Тогда расчетное значение вероятности безотказной работы (далее – ВБР) одного изделия за заданное время τ будет определяться равенством

$$P_0(\tau) = e^{-\left(\frac{\tau}{T_0}\right)}.$$

В качестве критерия получения эффективной оценки СНДО строится функционал (далее – $V(\hat{\theta})$), основанный на суммировании квадратов относительных смещений математических ожиданий оценок $\hat{\theta}(R, N)$ от параметра t экспоненциального з.р. (СНДО) для всех возможных значений t, N, τ [4, 5]:

$$V(\hat{\theta}(R, N, \tau)) = \frac{1}{3} \sum_{\tau_j=1E+3}^{\tau_j=1E+5} \frac{1}{10} \sum_{N=10}^{\infty} \int \left(\frac{1}{t}\right)^2 \{E\hat{\theta}(R, N, \tau_j) - t\}^2 \partial t.$$

Интегрирование ведется по всем возможным величинам параметра (СНДО) $t \in [0; \infty]$.

И строится функционал (далее – $H(\hat{\theta})$), основанный на суммировании математических ожиданий квадратов относительных уклонений оценок $\hat{\theta}(R, N)$ от параметра t экспоненциального з.р. (СНДО), для всех возможных значений t, N, τ [4, 5]:

$$H(\hat{\theta}(R, N, \tau)) = \frac{1}{3} \sum_{\tau_j=1E+3}^{\tau_j=1E+5} \frac{1}{10} \sum_{N=10}^{\infty} \int \left(\frac{1}{t}\right)^2 E\{\hat{\theta}(R, N) - t\}^2 \partial t.$$

Задачей функционала $H(\hat{\theta}(R, N, \tau))$ является определение степени разброса значений предложенных оценок СНДО.

Оценка СНДО, минимизирующая предлагаемые функционалы, является абсолютно эффективной среди предложенных оценок.

В соответствии с построенным критерием оценка СНДО $\hat{T}_1 = \frac{\tau}{-\ln(1 - \tilde{v}(R, N, \gamma = 0, 6))}$ показала небольшое преимущество перед оценкой $\hat{T}_4 = \frac{\tau}{-\ln(1 - \hat{v}(R, N, \gamma = 0, 5))}$ [4 – 5], а именно: $V(\hat{T}_1) = 10,59 < V(\hat{T}_4) = 11,01$, $H(\hat{T}_1) = 1035 > H(\hat{T}_4) = 538$.

Именно оценку $\hat{T}_1 = \frac{\tau}{-\ln(1 - \tilde{v}(R, N, \gamma = 0, 6))}$ следует признать эффективной в сравнении с оценкой $\hat{T}_4 = \frac{\tau}{-\ln(1 - \hat{v}(R, N, \gamma = 0, 5))}$, несмотря на то, что оценка \hat{T}_1 имеет несколько больший разброс.

Пример 1. В процессе испытаний на надежность по биномиальному плану одного изделия в течение назначенного времени отказы не возникали. Требуется дать оценку ВБР контролируемой партии изделий. Результаты расчета приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчета ВБР примера 1

$1 - \hat{v}$	$1 - \tilde{v}$	$1 - \hat{p}$	$1 - \tilde{p}$
0,5	0,86	0,5	0,86

Пример 2. В рамках примера 1 в процессе испытаний на надежность 10 изделий отказы не возникали. Требуется дать оценку ВБР контролируемой партии изделий. Результаты расчета приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты расчета ВБР примера 2

$1 - \hat{v}$	$1 - \tilde{v}$	$1 - \hat{p}$	$1 - \tilde{p}$
0,933	0,985	0,933	0,985

Рассмотрим эффективную точечную оценку ВБР за время t , равное времени испытаний τ , полученную для плана испытаний с восстановлением и ограниченным временем испытаний [2] в соответствии с критерием эффективности интегральных оценок [2], а именно:

$$\hat{P}_{NB\tau}(t) = e^{(-t/6N\tau)}, \text{ при } R = 0 \text{ и } \hat{P}_{NB\tau}(t) = e^{(-t^*(R+0,5)/N\tau)}, \text{ при } R > 0.$$

Эта оценка ВБР $\hat{P}_{NB\tau}(t)$ является эффективной по критерию интегральных оценок [2].

Исходя из логики построения биномиального плана и плана испытаний с восстановлением и ограниченным временем испытаний, оценки $\hat{P}_{NB\tau}(t)$ и $1 - \tilde{v}$ должны быть приблизительно равными для испытаний, не давших отказы. Покажем это.

Пример 3. В рамках примера 1 в процессе испытаний на надежность ряда из 1, ..., 10 изделий отказы не возникали. Требуется дать оценку ВБР контролируемой партии изделий, используя эффективные оценки для биномиального плана испытаний и плана испытаний с восстановлением и ограниченным временем испытаний. Результаты расчета приведены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты расчета ВБР примера 3

N	$1-\tilde{v},$ $\gamma=0,86$	$\hat{P}_{NB\tau}(t)=e^{\left(\frac{-t}{6N\tau}\right)}, t=\tau$	$\bar{p}=\frac{R+1}{n+2}$	$1-\hat{v},$ $\gamma=0,5$
1	0,86	0,846	0,667	0,500
2	0,927	0,920	0,750	0,707
3	0,951	0,946	0,800	0,794
4	0,963	0,959	0,833	0,841
5	0,970	0,967	0,857	0,871
6	0,975	0,973	0,875	0,891
7	0,978	0,976	0,889	0,906
8	0,981	0,979	0,900	0,917
9	0,983	0,982	0,909	0,926
10	0,985	0,983	0,917	0,933

Из примера 3 следует, что для биномиального плана и плана испытаний с восстановлением и ограниченным временем испытаний оценки $\hat{P}_{NB\tau}(t)$ и $1-\tilde{v}$ приблизительно равны для случая, когда в процессе испытаний отказы не возникали и объем испытаний не превышает 10 изделий. Выбор, какие оценки следует использовать в этом случае, остается за испытателем.

Рассмотрим эффективную точечную оценку СНДО, полученную для плана испытаний с восстановлением и ограниченным временем испытаний [1, 2] в соответствии с критерием эффективности интегральных оценок [2], а именно:

$$T_{01} = 2N\tau, \text{ при } R = 0 \text{ и } T_{01} = \frac{N\tau}{R+1}, \text{ при } R > 0.$$

Эта оценка СНДО является эффективной по критерию интегральных оценок 1-го типа (эффективной по смещению) на достаточно широком классе оценок [1, 2].

Исходя из логики построения биномиального плана и плана испытаний с восстановлением и ограниченным временем испытаний, оценки T_1 и T_{01} должны быть приблизительно равными для испытаний, не давших отказы. Покажем это.

Пример 4. В процессе испытаний на надежность в течение 10 000 ч ряда из 1, ..., 10 изделий отказы не возникали. Требуется дать оценку СНДО контролируемой партии изделий, используя эффективные оценки для биномиального плана испытаний и плана испытаний с восстановлением и ограниченным временем испытаний. Результаты расчета приведены в табл. 5.

Таблица 5

Результаты расчета СНДО примера 4

N	$\hat{T}_1 = \frac{\tau=1000}{-\ln(1-\tilde{v}(R=0, N, \gamma=0,6))}$	$T_{01} = 2N\tau, \text{ при } R = 0, \tau = 1000$
1	1958	2000
2	3923	4000
3	5855	6000
4	7823	8000
5	9788	10 000
6	11 748	12 000
7	13 698	14 000
8	15 660	16 000
9	17 611	18 000
10	19 576	20 000

Из примера 4 следует, что для биномиального плана и плана испытаний с восстановлением и ограниченным временем испытаний оценки \hat{T}_1 и \hat{T}_{01} приблизительно равны для случая, когда в процессе испытаний отказы не возникали и объем испытаний не превышает 10 изделий, что и следовало ожидать. Выбор, какие оценки следует использовать в этом случае, остается за испытателем.

Заключение

1. В результате проведенных исследований удалось получить:

– оценки ВБР \tilde{p} и \tilde{v} более эффективные в сравнении с ранее предложенными [4, 5];

– оценку СНДО $\hat{T}_1 = \frac{\tau}{-\ln(1 - \tilde{v}(R=0, N, \gamma=0, 6))}$ эффективную на достаточно широком клас-

се оценок и более эффективную в сравнении с ранее предложенными [4, 5].

2. Полученные оценки \tilde{p} и \tilde{v} , близкие к эффективной, и оценка \hat{T}_1 , эффективная на достаточно широком классе оценок, предлагаются к использованию для безотказных испытаний, проводимых по биномиальному плану.

3. Для биномиального плана и плана испытаний с восстановлением и ограниченным временем испытаний, оценки ВБР $1 - \tilde{v}$ и $\hat{P}_{NBt}(t)$, оценки СНДО \hat{T}_1 и \hat{T}_{01} приблизительно равны между собой для случая, когда в процессе испытаний отказы не возникали, что и следовало ожидать. Выбор, какие оценки следует использовать в этом случае, остается за испытателем.

Библиографический список

1. Михайлов, В. С. Нахождение эффективной оценки средней наработки на отказ / В. С. Михайлов // Надежность. – 2016. – № 4. – С. 40–42.
2. Михайлов, В. С. Исследование интегральных оценок потока отказов / В. С. Михайлов // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 2 (22). – С. 3–10.
3. Михайлов, В. С. Нахождение эффективной оценки средней наработки на отказ / В. С. Михайлов // Надежность и контроль качества. – 1988. – № 9. – С. 6–11.
4. Михайлов, В. С. Неявные оценки для плана испытаний типа NBt / В. С. Михайлов // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 1 (21). – С. 64–71.
5. Юрков, Н. К. Оценки показателей надежности для безотказных испытаний, проводимых по биномиальному плану / Н. К. Юрков, В. С. Михайлов // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 4 (18). – С. 29–39.
6. Боровков, А. А. Математическая статистика / А. А. Боровков. – Новосибирск : Наука ; Изд-во Института математики, 1997. – 772 с.
7. Шуленин, В. П. Математическая статистика. Часть 1. Параметрическая статистика / В. П. Шуленин. – Томск : Изд-во НТЛ, 2012. – 540 с.
8. Вопросы математической теории надежности / В. А. Каштанов, Ю. К. Беляев, А. Д. Соловьев, И. Н. Коваленко, Е. Ю. Барзилович, И. А. Ушаков ; под ред. Б. В. Гнеденко. – Москва : Радио и связь, 1983. – 376 с.
9. Савчук, В. П. Байесовские методы статистического оценивания: надежность технических объектов / В. П. Савчук. – Москва : Наука, 1989. – 328 с.

References

1. Mikhaylov V. S. *Nadezhnost'* [Reliability]. 2016, no. 4, pp. 40–42. [In Russian]
2. Mikhaylov V. S. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2018, no. 2 (22), pp. 3–10. [In Russian]
3. Mikhaylov V. S. *Nadezhnost' i kontrol' kachestva* [Reliability and quality control]. 1988, no. 9, pp. 6–11. [In Russian]
4. Mikhaylov V. S. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2018, no. 1 (21), pp. 64–71. [In Russian]
5. Yurkov N. K., Mikhaylov V. S. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2018, no. 4 (18), pp. 29–39. [In Russian]
6. Borovkov A. A. *Matematicheskaya statistika* [Mathematical statistics]. Novosibirsk: Nauka; Izd-vo Instituta matematiki, 1997, 772 p. [In Russian]
7. Shulenin V. P. *Matematicheskaya statistika. Chast' 1. Parametricheskaya statistika* [Mathematical statistics. Part 1. Parametric statistics]. Tomsk: Izd-vo NTL, 2012, 540 p. [In Russian]

8. Kashtanov V. A., Belyaev Yu. K., Solov'ev A. D., Kovalenko I. N., Barzilovich E. Yu., Ushakov I. A. *Voprosy matematicheskoy teorii nadezhnosti* [Problems of mathematical theory of reliability]. Moscow: Radio i svyaz', 1983, 376 p. [In Russian]
9. Savchuk V. P. *Bayesovskie metody statisticheskogo otsenivaniya: nadezhnost' tekhnicheskikh ob"ektov* [Bayesian methods of statistical estimation: reliability of technical objects]. Moscow: Nauka, 1989, 328 p. [In Russian]

Михайлов Виктор Сергеевич

ведущий инженер,
Центральный научно-исследовательский институт
химии и механики им. Д. И. Менделеева
(115487, Россия, г. Москва, ул. Нагатинская, 16а)
E-mail: Mvs1956@list.ru

Юрков Николай Кондратьевич

доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ,
заведующий кафедрой конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: yurkov_NK@mail.ru

Mikhailov Viktor Sergeevich

lead engineer,
Central Research Institute of Chemistry
and Mechanics named after D. I. Mendeleev
(115487, 16a Nagatinskaya street, Moscow, Russia)

Yurkov Nikolay Kondratievich

doctor of technical sciences, professor,
the honoured worker of science
of the Russian Federation,
head of sub-department of radio equipment design
and production,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Михайлов, В. С. Частный случай нахождения эффективных оценок / В. С. Михайлов, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2019. – № 2 (26). – С. 103–113. – DOI 10.21685/2307-4205-2019-2-12.

УДК 338.45:622.3

DOI 10.21685/2307-4205-2019-2-13

Е. В. Ширинкина

ОЦЕНКА ТЕНДОВ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ФИНАНСОВОЙ ОТРАСЛИ

E. V. Shirinkina

ASSESSMENT OF DIGITAL TRANSFORMATION TRENDS IN THE FINANCIAL INDUSTRY

Аннотация. *Актуальность и цели.* Актуальность проведенного в данной статье исследования обусловлена тем, что цифровая революция подрывает устойчивость банковской системы и ставит традиционных игроков перед необходимостью радикальных реформ. Объектом настоящего исследования являются мировые тенденции цифрового развития финансовой отрасли, ибо их верная интерпретация позволит выработать пути повышения уровня цифровизации, способствующей быстрому проведению преобразований. *Материалы и методы.* В ходе исследования трендов цифровой трансформации финансовой отрасли использованы данные Всемирного Банка, исследования опроса розничных клиентов банковского сектора, аналитику Корпоративного университета Сбербанка, данные IBM, данные международного рейтинга финансовой грамотности населения Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР). *Результаты.* Проведенный анализ показал: 1) по проникновению дистанционного банковского обслуживания Россия отстает от наиболее развитых рынков на 4–6 лет, однако при этом в России активно развивается сегмент банковских клиентов, использующих цифровые технологии для удаленного доступа; 2) в России продажи банковских услуг в цифровых каналах недостаточно диверсифицированы. Одним из препятствий для быстрого распространения цифровых каналов банковского обслуживания является невысокая финансовая грамотность россиян и недоверие к безналичным расчетам; 3) в России проникновение дистанционного банковского обслуживания отстает от проникновения Интернета, что указывает на потенциал его дальнейшего роста. *Выводы.* В условиях дальнейшего развития финтех-сектора и распространения цифровых техно-

Abstract. *Background.* The relevance of the research carried out in this article is due to the fact that the digital revolution is undermining the foundations of the banking system and confronting traditional players with the need for radical reforms. The object of this study is the global trends in the digital development of the financial industry, because their correct interpretation will help to work out ways to improve the level of digitalization that contributes to the rapid implementation of transformations. *Materials and methods.* The study of trends in the digital transformation of the financial industry used data from the World Bank, a McKinsey study of a survey of retail customers of the banking sector, analytics from the Sberbank Corporate University, IBM data, data from the International Financial Literacy Rating of the Organization for Economic Cooperation and Development (OECD). *Results.* The analysis showed: 1) according to the penetration of remote banking services, Russia lags behind the most developed markets by 4–6 years; however, at the same time, the segment of banking customers using remote access is actively developing in Russia; 2) in Russia, sales of banking services in digital channels are not sufficiently diversified. One of the obstacles to the rapid spread of digital channels of banking services is the low financial literacy of Russians and distrust of non-cash payments; 3) in Russia, the penetration of remote banking services lags behind the penetration of the Internet, which indicates the potential for its further growth. *Conclusions.* In the conditions of further development of the FINTECH sector and the spread of digital technologies, traditional banks have several possible ways of development. The most universal development option is the transformation of traditional banks into fully digital ones, which provide a wide range of classic financial products and services.

логий у традиционных банков есть несколько возможных путей развития. Наиболее универсальный вариант развития – превращение традиционных банков в полностью цифровые, которые предоставляют широкий спектр классических финансовых продуктов и услуг.

Ключевые слова: цифровизация, финансовая отрасль, банковская система, цифровые компетенции, оценка, тенденции.

Keywords: digitalization, financial industry, banking system, digital competencies, assessment, trends.

Введение

В эпоху цифровой экономики большинство российских банков в той или иной мере уже запустили процессы цифровых преобразований, однако у них разные шансы на успех: крупные банки используют преимущества своего масштаба и солидных бюджетов на цифровые технологии; для небольших банков дорогостоящая цифровизация имеет далекий горизонт окупаемости и создает большую нагрузку на их финансовый результат в краткосрочной перспективе [1–3].

В настоящее время складываются благоприятные условия для цифровой трансформации финансовой отрасли. Массовый переход российских клиентов на использование дистанционных каналов обслуживания – отличный шанс для банков предложить им новые технологии и современные цифровые продукты. Успех здесь зависит в первую очередь от самих кредитных организаций – амбициозности поставленных целей, наличия необходимых ресурсов для их достижения, эффективности усилий по формированию корпоративной культуры, способствующей быстрому проведению преобразований.

Достоинством цифровизации финансовой отрасли, будь то продажи новых продуктов или сервисное обслуживание в отделениях финансовых институтов, позволяет сократить их стоимость на 40–60 %. Клиентский опыт также улучшается за счет сокращения времени, необходимого для получения продукта или услуги, количества документов и контактов клиента с банком. Цифровые технологии повышают скорость и удобство оказания финансовых услуг, что способствует укреплению отношений банков со своими клиентами и партнерами. Согласно исследованию McKinsey, проведенному во Франции, розничные банки, активно развивающие дистанционные каналы обслуживания, смогли опередить традиционные кредитные учреждения по индексу потребительской лояльности Net Promoter Score в среднем на 15–60 пп. В корпоративном секторе применение технологии блокчейн позволило сократить время проведения международной торговой сделки в форме аккредитива примерно в 40 раз – с 7–10 дней до 4 ч (по данным Barclays, 2016 г.) [4].

Для того, чтобы определить основные драйверы российского цифрового развития, обратимся к глобальным трендам, происходящим в финансовой отрасли в цифровой экономике.

Методика исследования

Российские банки находятся сегодня «на низком старте» и обладают прекрасной возможностью быстро перевести клиентов на современные каналы дистанционного обслуживания. Доля клиентов, регулярно пользующихся дистанционным банковским обслуживанием, в России незначительна, но стремительно растет благодаря множеству благоприятных факторов. Кроме того, цифровая трансформация дает толчок к развитию портфеля продуктов и снижению кредитных рисков. По проникновению дистанционного банковского обслуживания Россия отстает от наиболее развитых рынков на 4–6 лет. По данным Всемирного банка, в странах Северной Европы, Австралии и США дистанционными банковскими услугами активно пользуются около 60 % клиентов (рис. 1).

В России таких клиентов вдвое меньше, несмотря на рост данного показателя в полтора раза с 2014 г. При этом лидирующие по проникновению дистанционного обслуживания российские банки более чем в два раза опережают конкурентов. В России проникновение дистанционного банковского обслуживания отстает от проникновения Интернета, что указывает на потенциал его дальнейшего роста.

Уровень проникновения дистанционного банковского обслуживания в России сильно отстает от уровня распространенности Интернета, а значит, обладает серьезным потенциалом роста. Быстрому переходу на цифровое банковское обслуживание в России благоприятствуют многие факторы, прежде всего готовность потребителей покупать банковские продукты через Интернет. Согласно проведенному McKinsey в 2016 г. опросу, доля розничных клиентов банковского сектора среди городских интернет-пользователей в России составляет 65 % – это сравнимо с показателями стран Ев-

ропы (60–70 %) и выше, чем в Северной Америке (55 %). Особенностью российского рынка является популярность такой инновации, как банки без отделений (direct banking). Например, «Тинькофф» – крупнейший независимый банк такого рода в мире, занимает 12-е место среди банков России по объему розничного кредитного портфеля и второе – по выпуску кредитных карт. На российском рынке уже распространены современные и удобные мобильные и онлайн-приложения с широким спектром функциональных возможностей.

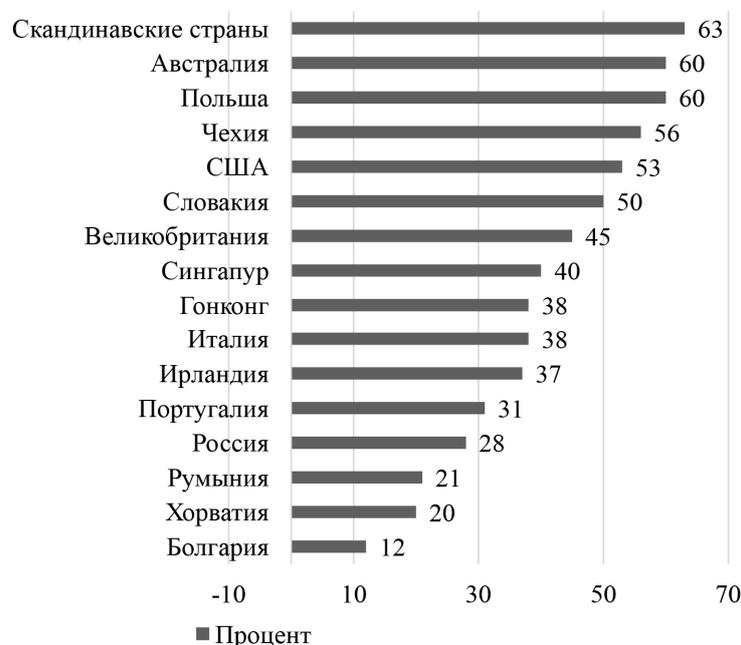


Рис. 1. Доля клиентов банков, воспользовавшихся каким-либо цифровым каналом, % [5, 6]

Наш анализ показал, что мобильные приложения крупнейших российских банков имеют в 1,5–2 раза больше функций транзакционного обслуживания, чем аналогичные приложения крупнейших европейских банков (рис. 2).

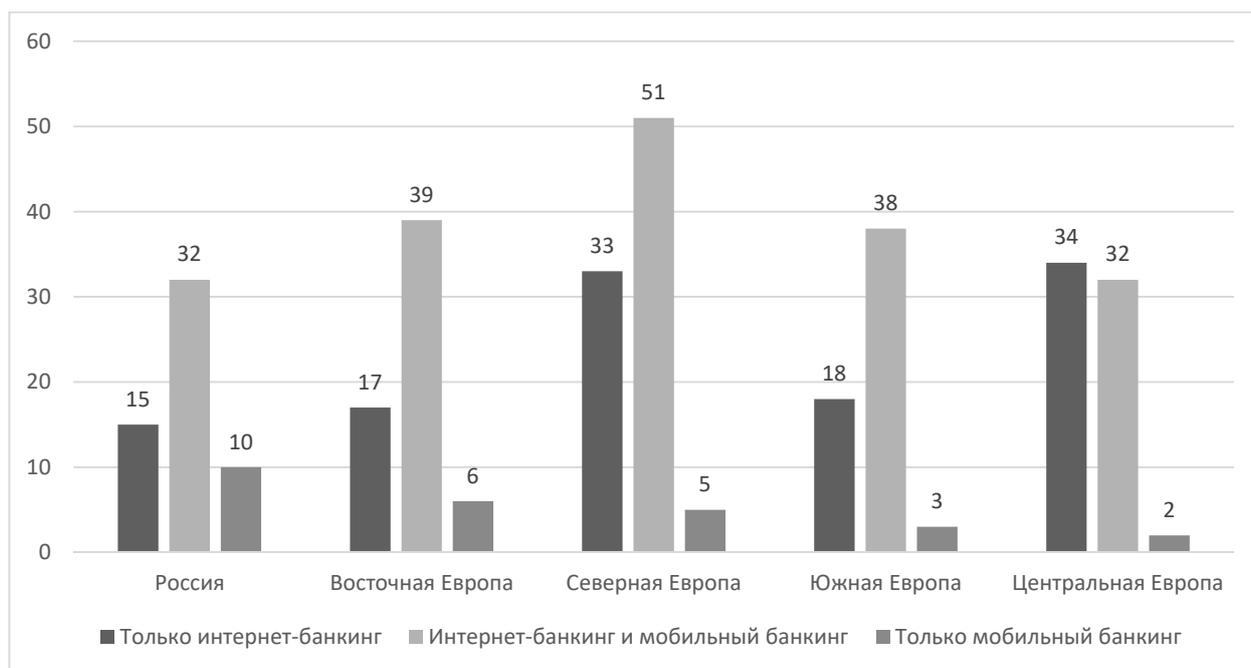


Рис. 2. Проникновение цифровых каналов в банковской системе, % респондентов* (* – доля респондентов, использовавших интернет-банкинг и/или мобильный банкинг хотя бы один раз за последние три месяца) [7]

В целом у России самый низкий уровень проникновения цифровых каналов по сравнению с другими регионами. При этом в России активно развивается сегмент банковских клиентов, использующих для удаленного доступа только мобильное приложение: доля таких респондентов составляет 10 %, что является самым высоким показателем среди других рынков. У многих российских клиентов отсутствует свойственная потребителям банковских услуг на Западе привычка поддерживать личные отношения со «своим представителем банка» или использовать колл-центр для осуществления транзакций. Это создает предпосылки для более динамичного развития цифровых банковских сервисов и роста числа их клиентов.

Россия уже опережает европейские страны по доле клиентов, использующих для удаленного банковского обслуживания только мобильный канал. В России самым быстрорастущим каналом является мобильный банкинг: за период с 2014 по 2016 г. уровень его распространенности вырос втрое. При этом, согласно данным исследования McKinsey, уже сейчас 10 % россиян используют для дистанционного самообслуживания только мобильные приложения. Для многих новых пользователей мобильный канал самообслуживания становится первым и единственным.

Такая ситуация нетипична для традиционных рынков финансовых услуг и дает российским банкам шанс, сконцентрировав усилия, успешно перевести своих клиентов на обслуживание через мобильные приложения, минуя интернет-банкинг и колл-центры. Развитие дистанционных каналов обслуживания открывает банкам значительные возможности в сфере продаж. Несмотря на то, что сегодня по доле продаж банковских продуктов через Интернет Россия сопоставима с другими странами с обширной территорией (в 2016 г. этот показатель в России, Австралии и США находился в диапазоне 10–20 %), лишь 5 % цифровых продаж приходится на банковские сайты для внешних пользователей (в Австралии – 55 %, в США – 62 %). Основной финансовый продукт, который россияне приобретают через Интернет, – это депозиты (92 % всех цифровых продаж), в то время как доля продаж кредитных и прочих продуктов (дебетовых карт, страховок и др.) составляет всего 8 %. Для сравнения, в Польше эта доля составляет 18 % [4].

Эти примеры говорят о том, что потенциал увеличения продаж кредитных и других продуктов через Интернет у российских банков пока еще не полностью реализован (рис. 3).

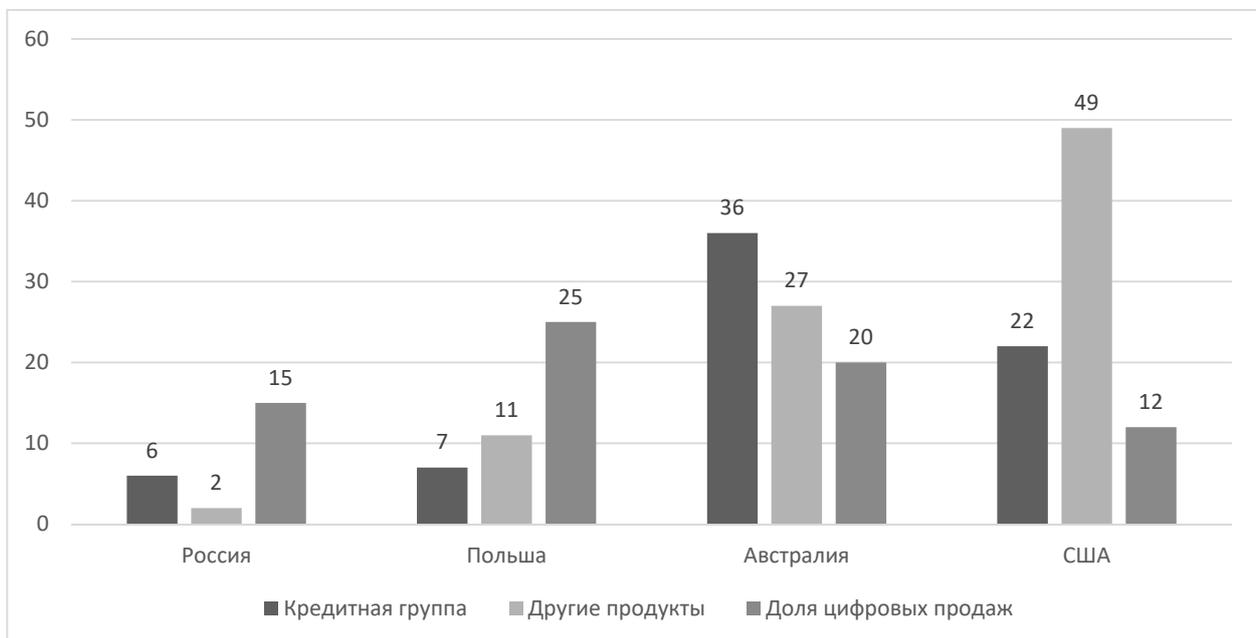


Рис. 3. Структура продаж в цифровых каналах по продуктовой группе [7, 8]

Очевидно, что в России продажи банковских услуг в цифровых каналах недостаточно диверсифицированы. Одним из препятствий для быстрого распространения цифровых каналов банковского обслуживания является невысокая финансовая грамотность россиян и недоверие к безналичным расчетам.

В международном рейтинге финансовой грамотности населения Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР) за 2016 г. Россия занимает 25-е место из 29, уступая таким стра-

нам, как Малайзия и Грузия. О низком уровне доверия к безналичным расчетам говорит и то, что 71 % объема операций с использованием платежных карт в России приходится на снятие наличных (по данным ЦБ РФ на конец 2016 г.). Банкам необходимо помогать своим клиентам в освоении дистанционного обслуживания, упрощать связанные с ним процессы и интерфейсы, а также продолжать работу над оптимизацией ценообразования, стимулируя клиентов отказываться от транзакционного обслуживания в отделениях.

Готовность российских пользователей к переходу на цифровые каналы банковского обслуживания упрощает процесс взаимодействия банка с клиентами и открывает широкие возможности для увеличения онлайн-продаж банковских продуктов, которые пока недостаточно широко представлены на российском рынке. К таковым относятся ипотечное кредитование, управление частным капиталом (в том числе финансовые инвестиции), РКО и другие продукты для малого и среднего бизнеса.

Благоприятным фактором станет улучшение нормативной базы, регулирующей взаимоотношения с клиентами по дистанционным каналам, и деятельность финтех-компаний. Успешные программы цифровой трансформации предполагают наличие амбициозных целей, достаточных ресурсов для их достижения, а также пристального внимания со стороны высшего руководства – часто в виде назначения руководителя на уровне правления, который будет нести ответственность за программу, обеспечивая контроль за ней и курируя ее наряду с другими стратегическими задачами банка. Основой такой трансформации становятся не только создание новых клиентских интерфейсов и автоматизация процессов, но и внедрение методологии Agile в сфере разработки, поощрение межфункционального взаимодействия, внедрение в корпоративную культуру принципов дизайн-мышления (design-thinking), требующих глубокого понимания клиентских потребностей, быстрого создания прототипов новых решений и постоянного тестирования их совместно с конечными пользователями. Кроме того, важным фактором является умение активно взаимодействовать с технологическими компаниями в рамках совместной разработки и внедрения инновационных решений, аутсорсинга инноваций или других форм сотрудничества. Например, небольшие финансовые организации, которые не могут позволить себе модернизацию собственной ИТ-системы, могут воспользоваться услугами компаний, предоставляющих технологические решения в формате аутсорсинга – от облачных услуг по хранению и обработке данных до применения передовых аналитических методов для анализа больших данных. Другими стратегическими партнерами банков станут (и тому уже есть примеры) агрегаторы пользовательской информации (например, социальные сети и операторы связи), предоставляющие доступ к внешним данным о клиентах с целью повышения точности кредитного скоринга, перекрестных продаж и т.д.

Полученные результаты

Проведенный анализ показал:

1) по проникновению дистанционного банковского обслуживания Россия отстает от наиболее развитых рынков на 4–6 лет, однако при этом, в России активно развивается сегмент банковских клиентов, использующих дистанционные каналы для удаленного доступа;

2) в России продажи банковских услуг в цифровых каналах недостаточно диверсифицированы. Одним из препятствий для быстрого распространения цифровых каналов банковского обслуживания является невысокая финансовая грамотность россиян и недоверие к безналичным расчетам;

3) в России проникновение дистанционного банковского обслуживания отстает от проникновения Интернета, что указывает на потенциал его дальнейшего роста [9].

Заключение

В условиях дальнейшего развития финтех-сектора и распространения цифровых технологий у традиционных банков есть несколько возможных путей развития. Наиболее универсальный вариант развития – превращение традиционных банков в полностью цифровые, которые предоставляют широкий спектр классических финансовых продуктов и услуг. Большинство крупнейших российских банков придерживаются именно этого направления.

Благодаря цифровой трансформации всех уровней бизнеса и применению новых технологических решений банки смогут усовершенствовать текущие предложения клиентам. Однако для успешного преобразования в полностью цифровой универсальный банк финансовым организациям

необходимо обладать достаточными профессиональными компетенциями широкого профиля. Кроме того, определяющим фактором успеха на российском рынке является скорость сокращения «цифрового разрыва».

Библиографический список

1. *Майстер, В. А.* Роль интеллектуального капитала в технологическом оснащении производства / В. А. Майстер, Е. В. Ширинкина // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 1 (13). – С. 107–113.
2. *Ширинкина, Е. В.* Особенности функционирования промышленных предприятий в цифровой экономике / Е. В. Ширинкина // Экономика в промышленности. – 2018. – Т. 11. – № 2. – С. 143–150.
3. *Shirinkina, E.* Management of human capital in the national economy: Estimation and simulation / E. Shirinkina, A. Kodintsev // Revista Espacios. – 2018. – Vol. 39, iss. 44. – P. 28.
4. Обучение цифровым навыкам: глобальные вызовы и передовые практики. Аналитический отчет / В. С. Катъкало, Д. Л. Волков, И. Н. Баранов, Д. А. Зубцов, А. В. Липчанский, Е. В. Соболев, В. И. Юрченков, А. А. Старовойтов, П. А. Сафронов. – Москва : АНО ДПО «Корпоративный университет Сбербанка», 2018 – 136 с.
5. Статистическая информация The World Bank Group / Всемирный банк. 2017. – URL: <http://databank.worldbank.org/data/reports.aspx?source=2&series=it.net.user.p2&country=>
6. *Frisiani, G.* A future for mobile operators: The keys to successful reinvention / G. Frisiani, J. Jubas, T. Lajous, P. Nattermann. – McKinsey, 2017. – URL: <http://www.mckinsey.com/industries/telecommunications/our-insights/a-future-for-mobile-operators-the-keys-to-successfulreinvention>.
7. Digital McKinsey. – URL: <http://www.mckinsey.com/global-locations/europe-andmiddleeast/russia/ru/our-work/mckinsey-digital>
8. IBM Institute for Business Value. Facing the storm. Navigating the global skills crisis. – 2016. – URL: <http://blog.oxfordeconomics.com/>
9. *Майстер, В. А.* Цифровая трансформация финансовой отрасли как фактор конкурентоспособности / В. А. Майстер, Е. В. Ширинкина // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2018. – Т. 2. – С. 269–271.

References

1. Mayster V. A., Shirinkina E. V. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2016, no. 1 (13), pp. 107–113. [In Russian]
2. Shirinkina E. V. *Ekonomika v promyshlennosti* [Economy in industry]. 2018, vol. 11, no. 2, pp. 143–150. [In Russian]
3. Shirinkina E., Kodintsev A. *Revista Espacios* [Space Magazine]. 2018, vol. 39, iss. 44, p. 28.
4. Kat'kalo V. S., Volkov D. L., Baranov I. N., Zubtsov D. A., Lipchanskiy A. V., Sobolev E. V., Yurchenkov V. I., Starovoytov A. A., Safronov P. A. *Obuchenie tsifrovym navykam: global'nye vyzovy i peredovye praktiki. Analiticheskiy otchet* [Digital skills training: global challenges and best practices. Analytical report]. Moscow: ANO DPO «Korporativnyy universitet Sberbanka», 2018, 136 p. [In Russian]
5. *Statisticheskaya informatsiya The World Bank Group* [Statistical information of The World Bank Group]. The World Bank Group. 2017. Available at: <http://databank.worldbank.org/data/reports.aspx?source=2&series=it.net.user.p2&country=>
6. Frisiani G., Jubas J., Lajous T., Nattermann P. *A future for mobile operators: The keys to successful reinvention*. McKinsey, 2017. Available at: <http://www.mckinsey.com/industries/telecommunications/our-insights/a-future-for-mobile-operators-the-keys-to-successfulreinvention>.
7. *Digital McKinsey*. Available at: <http://www.mckinsey.com/global-locations/europe-andmiddleeast/russia/ru/our-work/mckinsey-digital>
8. *IBM Institute for Business Value. Facing the storm. Navigating the global skills crisis*. 2016. Available at: <http://blog.oxfordeconomics.com/>
9. Mayster V. A., Shirinkina E. V. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and quality]. 2018, vol. 2, pp. 269–271. [In Russian]

Ширинкина Елена Викторовна

кандидат экономических наук, доцент,
заведующий кафедрой менеджмента и бизнеса,
Сургутский государственный университет
(628426, Россия, г. Сургут, просп. Ленина, 1)
E-mail: shirinkina86@yandex.ru

Shirinkina Elena Viktorovna

candidate of economic sciences, associate professor,
head of sub-department of management and business,
Surgut State University
(628426, 1 Lenin avenue, Surgut, Russia)

Образец цитирования:

Ширинкина, Е. В. Оценка трендов цифровой трансформации финансовой отрасли / Е. В. Ширинкина // Надежность и качество сложных систем. – 2019. – № 2 (26). – С. 114–120. – DOI 10.21685/2307-4205-2019-2-13.

ОРГАНИЗАЦИЯ И БЕЗОПАСНОСТЬ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ

ORGANIZATION AND SAFETY OF ROAD TRAFFIC

УДК 656.135.073:658.562

DOI 10.21685/2307-4205-2019-2-14

А. В. Цыганов

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ В УПРАВЛЕНИИ КАЧЕСТВОМ КОНТРЕЙЛЕРНЫХ ПЕРЕВОЗОК

A. V. Tsyganov

USE OF THE ANALYTIC HIERARCHY PROCESS IN QUALITY MANAGEMENT OF PIGGYBACK TRANSPORTATIONS

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рассматривается один из инновационных путей развития транспорта – организация контейнерных перевозок в Российской Федерации. При этом в настоящее время российская транспортная система характеризуется недостаточно высоким качеством оказания транспортных услуг. Акцентируется внимание на необходимости нормирования требований к качеству контейнерных перевозок и разработки методики обеспечения соблюдения этих норм. *Научные подходы и методы.* Применение системного подхода позволяет рассматривать контейнерные перевозки как сложную техническую систему, состоящую из большого количества элементов, функционирование которых формирует качество транспортного процесса. Предложено использование метода анализа иерархий для определения степени влияния элементов на итоговое качество процесса. *Результаты.* Для нормирования качества контейнерных перевозок предложен комплекс показателей качества. Приведена иерархическая модель управления качеством рассматриваемого транспортного процесса с подробным описанием применения метода анализа иерархий. Определена значимость параметров процесса контейнерных перевозок с точки зрения влияния на качество. *Выводы.* Представленная методика является универсальной и может быть использована для прогнозирования влияния элементов сложных систем на надежность их функционирования.

Abstract. *Background.* In article one of the innovation ways of development of transport – the organization of piggyback transportations in the Russian Federation is considered. At the same time now the Russian transport system is characterized by insufficiently high quality of rendering transport services. The attention to need of regulation of quality requirements of piggyback transportations and development of a technique of ensuring compliance with these regulations is focused. *Scientific approaches and methods.* Application of system approach allows to consider piggyback transportations as the complex technical system consisting of a large number of elements which functioning forms quality of transportation process. Use of the analytic hierarchy process for determination of extent of influence of elements on total quality of process is offered. *Results.* For regulation of quality of piggyback transportations the complex of indicators of quality is offered. Hierarchical management model by quality of the considered transportation process with the detailed description of application of a method is given. The importance of parameters of process of piggyback transportations in terms of influence on quality is defined. *Conclusions.* The introduced technique is universal and can be used for forecasting of influence of elements of complex systems for reliability of their functioning and also estimates and quality managements of transportations of various categories of freights.

ния, а также оценки и управления качеством перевозок различных категорий грузов.

Ключевые слова: транспорт, контейнер, контейнерная перевозка, услуга транспортная, качество процесса, показатели качества, метод анализа иерархий.

Keywords: transport, piggyback, piggyback transportation, transport service, process quality, quality index, analytic hierarchy process.

Введение

В мировой практике контейнерные перевозки применяются со второй половины XX в. Ведущими странами в данном сегменте перевозок являются США, Канада, Австралия и страны Евросоюза [1, 2]. В настоящее время в России ведется активная работа по внедрению данной транспортной технологии, обеспечивающей современное взаимодействие автомобильного и железнодорожного видов транспорта. Реализация технологии будет способствовать повышению транспортного и транзитного потенциала страны, развитию интермодальных перевозок [3]. Основным заинтересованным субъектом является ПАО «РЖД», поскольку это позволит увеличить объемы перевозок грузов по магистральным железным дорогам. Одним из наиболее важных приоритетов для компании будет обеспечение высокого качества предоставляемой услуги как фактора конкурентоспособности по отношению к автомобильному транспорту [4, 5]. В связи с этим возникает актуальная научная задача нормирования требований к качеству контейнерных перевозок и разработки методики обеспечения соблюдения этих норм.

Обоснование требований к качеству контейнерных перевозок

Предлагается для оценки и нормирования качества контейнерных перевозок использовать следующие группы показателей качества: своевременность, сохранность, экономичность [6]. Сохранность перевозки является характеристикой транспортной услуги, обуславливающей перевозку контейнеров без потерь, повреждений, пропаж и загрязнений. Своевременность оценивает отклонение прибытия контейнеров в конечный пункт от установленного договором срока доставки [7]. Экономичность доставки характеризует перевозку контейнеров по величине совокупных транспортных затрат [8]. Номенклатура групп показателей качества приведена на рис. 1.



Рис. 1. Система показателей качества контейнерных перевозок

Следует учитывать, что на начальном этапе организации контрейлерных перевозок возможность оценки качества данного процесса через предложенную систему показателей будет ограничена отсутствием фактических значений показателей ввиду нереализованности данных перевозок в России и, как следствие, установлением только нормативных значений показателей. Кроме того, попытки применения данной технологии в стране до настоящего времени оказывались неудовлетворительными. Причинами неудач являлись: несовершенство конструкций железнодорожного подвижного состава, необходимость создания особых условий погрузки-выгрузки автомобильных транспортных средств, несогласованность взаимодействия участников транспортного процесса, состояние вагонного парка и терминальной инфраструктуры и др. [9, 10]. Недостаточно высокое качество транспортных услуг характеризует в настоящее время всю российскую транспортную систему [11].

Поэтому обеспечение и достижение нормативных значений показателей качества возможно при условии системного анализа причин, в той или иной форме оказывающих влияние на значения показателей. Таким образом, мы говорим о необходимости выстраивания причинно-следственных связей и управлении параметрами, влияющими и формирующими качество процесса контрейлерных перевозок [12]. Очевидно, что первостепенное внимание должно быть уделено параметрам, оказывающим наибольшее влияние, и соответственно, необходимости их ранжирования для определения приоритетов при разработке и принятии управленческих решений.

Для формирования причинно-следственных связей предлагается использовать принцип иерархического отображения организации взаимосвязей качества процесса с его параметрами. Многоуровневая детализация процесса обусловлена значительным количеством параметров и различной степенью их влияния на итоговое качество [13, 14]. Применение данного принципа позволяет моделировать функционирование сложных систем, к которым относятся различные транспортные системы, обеспечивая упорядоченность элементов и облегчая процесс управления качеством. Оценка значимости параметров процесса контрейлерных перевозок с точки зрения влияния на качество должна учитывать следующие условия:

- показатели качества и параметры различных уровней могут иметь различную значимость для транспортной компании и грузовладельцев;
- параметры могут формировать значения нескольких показателей качества, оказывая на них разную степень влияния.

Этапы использования метода анализа иерархий

Представление полученной системы взаимосвязей параметров в виде иерархии и необходимость определения степени влияния параметров на итоговое качество процесса делают возможным применение метода анализа иерархий, разработанного американским ученым Т. Саати [15, 16]. Оценка значимости параметров с точки зрения их влияния на итоговое качество процесса контрейлерных перевозок при развертывании функции качества путем ее иерархической декомпозиции проводится следующими этапами.

1 этап – построение иерархической структуры качества процесса

Под структурой качества понимают систему взаимосвязей параметров процесса с показателями качества, которая определяет итоговое качество процесса. Структура качества формируется в виде многоуровневой иерархии. В результате итоговое качество процесса детализируется (декомпозируется) на некоторое количество групп иерархии. Отнесение группы иерархии к определенному уровню осуществляется путем установления влияния и зависимости элементов определенной группы от элементов другой группы. При необходимости определяется наличие зависимости между элементами групп иерархии, отнесенных к одному уровню, так как в общем случае группы одного уровня считаются независимыми [17].

Так, рассматривая контрейлерные перевозки с позиций системного подхода как сложную техническую систему, состоящую из большого числа элементов [18], функционирование которых определяет качество транспортного процесса, формируется следующая иерархическая структура (рис. 2). Описание входящих в нее элементов приведено в работах [6, 19].

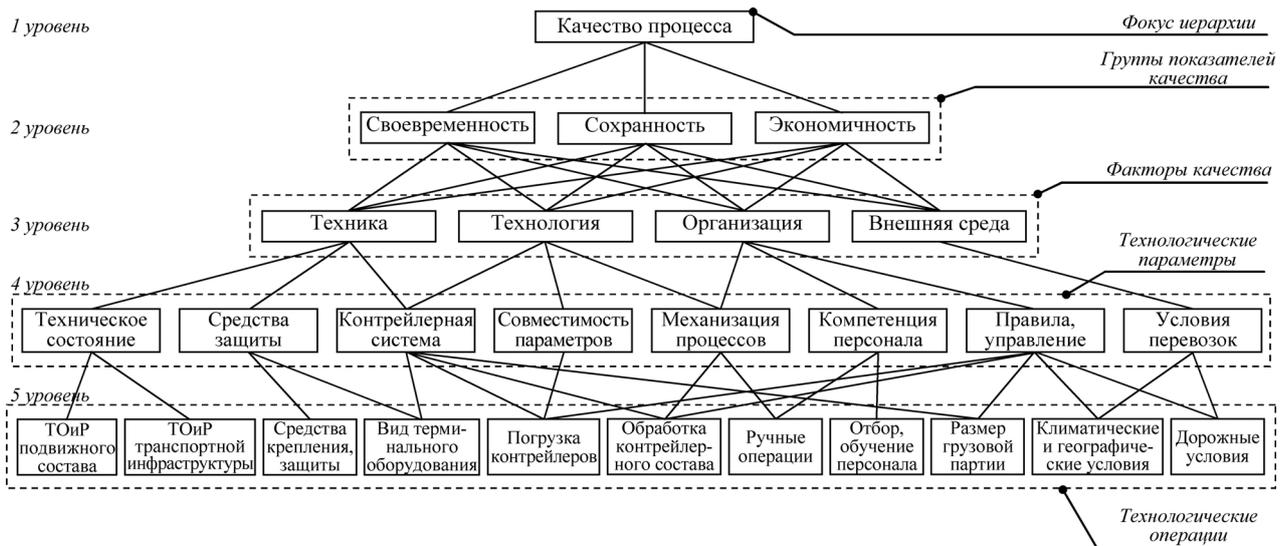


Рис. 2. Иерархическая модель управления качеством процесса контрейлерных перевозок

На первом уровне находится центральная группа – итоговое качество процесса, именуемое фокусом иерархии. На втором уровне иерархии расположены три группы – показатели качества. На третьем уровне размещены четыре группы – факторы качества, непосредственно оказывающие влияние на вышележащие показатели качества. На четвертом уровне представлены группы технологических параметров, влияющие на факторы качества. На пятом уровне – группы технологических операций, формирующие технологические параметры. Взаимосвязи между группами иерархии отражают наличие влияния элементов друг на друга.

2 этап – определение значимости элементов в группах иерархии

Под значимостью элемента группы иерархии понимается важность данного элемента в иерархической группе. Оценка значимости проводится методом парного сравнения, в основе которого лежит сопоставление двух выбранных элементов в группе между собой по степени важности с использованием шкалы отношений, имеющей диапазон чисел от 1 до 9 (где 1 – равная предпочтительность, 9 – абсолютное преобладание одного над другим) (табл. 1).

Таблица 1

Шкала отношений [15]

Степень важности	Определение	Объяснение
1	Одинаковая значимость	Оба элемента вносят одинаковый вклад в достижение цели
3	Некоторое преобладание значимости одного элемента перед другим (слабая значимость)	Один элемент имеет незначительное превосходство перед другим элементом
5	Существенная (сильная) значимость	Один элемент значительно превосходит другой элемент
7	Очень сильная (очевидная) значимость	Предпочтение одного элемента над другим очевидно
9	Абсолютная значимость	Предпочтение одного элемента над другим абсолютно
2, 4, 6, 8	Промежуточные значения между соседними значениями шкалы	Ситуация, когда необходимо компромиссное решение

Сравнения элементов фиксируются в табличной форме. В результате формируются диагональные матрицы, в общем случае обладающие свойством обратной симметрии:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & 1 & \dots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & \dots & 1 \end{bmatrix}.$$

Размерность матриц парного сравнения определяется количеством элементов в группе иерархии, а количество матриц – числом уровней иерархической структуры.

3 этап – определение локальных приоритетов групп иерархии и оценка согласованности суждений

Под локальным приоритетом группы иерархии понимается ее интенсивность влияния на группу более высокого уровня относительно других групп, расположенных на том же уровне. Определение локальных приоритетов групп иерархии проводится путем вычисления вектора приоритетов по каждой матрице. Под вектором приоритета понимается нормализация главного собственного вектора – умножение n элементов каждой строки матрицы и извлечение корня n -й степени из произведений, с последующим расчетом отношений полученных чисел на сумму данных чисел.

Под согласованностью суждений понимается логичность сравнений элементов в границах каждой матрицы. Рассогласованность суждений возрастает при увеличении размерности матрицы. Логичность сравнений определяется численной оценкой – отношением согласованности (ОС), которое рассчитывается через отношение индекса согласованности к случайному индексу для матрицы той же размерности:

$$ОС = \frac{ИС}{СИ}, \tag{1}$$

где $ИС$ – индекс согласованности матрицы; $СИ$ – среднее значение случайного индекса матрицы.

Индекс согласованности матрицы (ИС) определяется по формуле [15]:

$$ИС = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}, \tag{2}$$

где λ_{\max} – максимальное собственное значение матрицы, рассчитываемое, например, с помощью сервисов [20, 21]; n – количество сравниваемых элементов (размерность матрицы). Отметим, что для полностью согласованной матрицы парных сравнений $\lambda_{\max} = n$, а разность $\lambda_{\max} - n$ является мерой согласованности суждений парного сравнения элементов матрицы.

Значение случайного индекса матрицы (СИ) зависит от ее размерности и определяется по табл. 2.

Таблица 2

Средние значения случайного индекса СИ [15]

Размерность матрицы, n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Значение СИ	0,00	0,00	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51	1,48	1,56	1,57	1,59

Согласованность суждений считается приемлемой, если $ОС \leq 0,10$. Превышение данного значения, как правило, требует пересмотра суждений.

4 этап – определение глобальных приоритетов групп иерархии и их ранжирование

Под глобальным приоритетом группы иерархии понимается ее интенсивность влияния на фокус иерархии относительно других групп, расположенных на том же уровне. Определение глобальных приоритетов групп иерархии проводится путем вычисления глобального вектора приоритетов – умножением сводной матрицы локальных приоритетов групп иерархии определенного уровня на вектор локальных приоритетов матрицы вышележащего уровня иерархии, связанной с ними:

$$R_j = \sum_{i,j=1}^{n,m} V_j \cdot r_i, \tag{3}$$

где R_j – глобальный приоритет j -й группы иерархии нижележащего уровня; V_j – локальный приоритет j -й группы иерархии нижележащего уровня; r_i – локальный приоритет i -й группы иерархии вышележащего уровня; n, m – соответственно количество групп иерархии вышележащего и нижележащего уровня.

Таким образом, значения глобальных приоритетов групп иерархии, расположенных на одном уровне, будут зависеть от значимости элементов, формирующих данные группы, а также от значимости групп иерархий, с которыми они связаны. Более высокие глобальные приоритеты свидетельствуют о большем влиянии группы на фокус иерархии. На основе рассчитанных приоритетов, группы могут быть проранжированы с точки зрения их влияния на фокус иерархии.

Оценка значимости параметров процесса контрейлерных перевозок с точки зрения влияния на качество

Приведем пример использования метода анализа иерархий для определения степени влияния элементов первых трех уровней иерархии на итоговое качество процесса контрейлерных перевозок (см. рис. 2). В этом случае задача будет заключаться в определении влияния факторов качества на итоговое качество процесса через промежуточный второй уровень – показатели качества.

Построим матрицу парных сравнений показателей качества в соответствии с их воздействием на фокус иерархии – обеспечения качества процесса (табл. 3).

Таблица 3

Сравнение показателей качества относительно итогового качества

Обеспечение качества процесса	Своевременность	Сохранность	Экономичность	Локальный приоритет	Согласованность суждений
Своевременность	1	2/3	1/3	0,182	$\lambda_{\max} = 3,00$ ИС = 0,0 ОС = 0,0
Сохранность	3/2	1	1/2	0,273	
Экономичность	3	2	1	0,545	

Рассчитаем локальные приоритеты групп иерархии второго уровня к фокусу иерархии:

$$\begin{aligned}
 \text{Своевременность: } & \sqrt[3]{1 \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{3}} = 0,61; & \frac{0,61}{3,33} = 0,182; \\
 \text{Сохранность: } & \sqrt[3]{\frac{3}{2} \cdot 1 \cdot \frac{1}{2}} = 0,91; & \frac{0,91}{3,33} = 0,273; \\
 \text{Экономичность: } & \sqrt[3]{3 \cdot 2 \cdot 1} = 1,82; & \frac{1,82}{3,33} = 0,545; \\
 \text{Сумма: } & 0,61 + 0,91 + 1,82 = 3,33.
 \end{aligned}$$

Определим согласованность суждений:

Максимальное собственное значение, $\lambda_{\max} = 3,00$;

Индекс согласованности (по формуле 2), $ИС = \frac{3,00 - 3}{3 - 1} = 0$;

Среднее значение индекса согласованности (по табл. 2), $СИ = 0,58$;

Отношение согласованности (по формуле 1), $ОС = \frac{0}{0,58} = 0$.

Построим матрицы парных сравнений факторов качества в соответствии с их воздействием на показатели качества процесса (табл. 4). Введем буквенное обозначение факторов качества: Техника – ТН, Технология – ТХ, Организация – ОР, Внешняя среда – ВС. Аналогично рассчитаем локальные приоритеты групп иерархии третьего уровня к группам иерархии второго уровня и согласованность суждений.

Рассчитаем глобальные приоритеты групп иерархии третьего уровня к фокусу иерархии (по формуле (3)):

$$\begin{bmatrix} 0,133 & 0,464 & 0,103 \\ 0,559 & 0,183 & 0,433 \\ 0,261 & 0,273 & 0,381 \\ 0,048 & 0,080 & 0,083 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0,182 \\ 0,273 \\ 0,545 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,133 \cdot 0,182 + 0,464 \cdot 0,273 + 0,103 \cdot 0,545 \\ 0,559 \cdot 0,182 + 0,183 \cdot 0,273 + 0,433 \cdot 0,545 \\ 0,261 \cdot 0,182 + 0,273 \cdot 0,273 + 0,381 \cdot 0,545 \\ 0,048 \cdot 0,182 + 0,080 \cdot 0,273 + 0,083 \cdot 0,545 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,207 \\ 0,388 \\ 0,330 \\ 0,076 \end{bmatrix}$$

Таблица 4

Сравнение факторов качества относительно показателей качества

Фактор качества	ТН	ТХ	ОР	СР	Локальный приоритет	Согласованность суждений
Своевременность						
ТН	1	1/5	1/3	5	0,133	$\lambda_{\max} = 4,24$ ИС = 0,08 СИ = 0,90 ОС = 0,09
ТХ	5	1	3	7	0,559	
ОР	3	1/3	1	5	0,261	
ВС	1/5	1/7	1/5	1	0,048	
Сохранность						
ТН	1	5	1	5	0,464	$\lambda_{\max} = 4,264$ ИС = 0,088 СИ = 0,90 ОС = 0,098
ТХ	1/5	1	1	3	0,183	
ОР	1	1	1	3	0,273	
ВС	1/5	1/3	1/3	1	0,080	
Экономичность						
ТН	1	1/5	1/5	2	0,103	$\lambda_{\max} = 4,14$ ИС = 0,047 СИ = 0,90 ОС = 0,05
ТХ	5	1	1	5	0,433	
ОР	5	1	1	3	0,381	
ВС	1/2	1/5	1/3	1	0,083	

Значимость параметров процесса контрейлерных перевозок с точки зрения влияния на качество приведена на рис. 3.

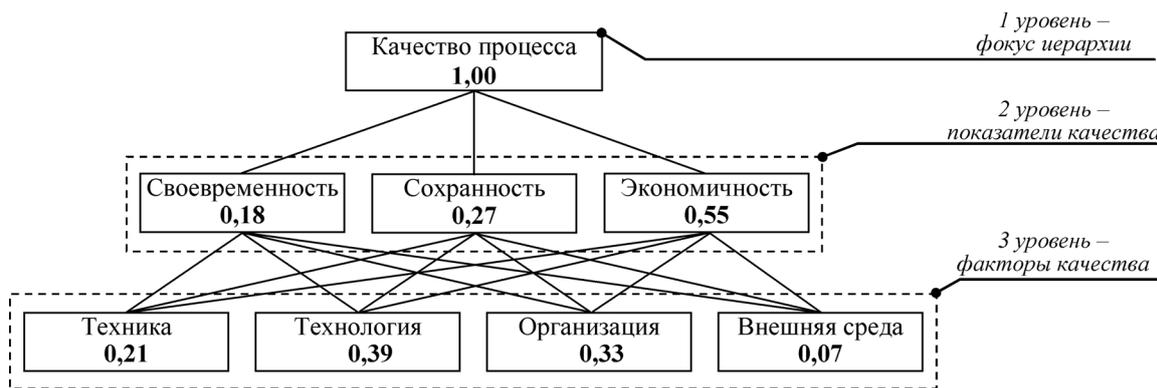


Рис. 3. Степень влияния показателей и факторов качества на итоговое качество процесса контрейлерных перевозок

Проранжируем группы с точки зрения их влияния на фокус иерархии. Наиболее значимыми показателями качества будут являться показатели, характеризующие экономичность доставки (вес – 0,55) и сохранность перевозки (вес – 0,27). Факторами качества, оказывающими наибольшее влияние на данные показатели и итоговое качество процесса, являются: технологический – учитываемые в контрейлерных перевозках технологические решения (вес – 0,39); организационный – учитывающий управленческую составляющую контрейлерных перевозок (вес – 0,33); технический – учитывающий состояние технических средств и объектов транспортной инфраструктуры, задействованных в перевозках (вес – 0,21).

Заключение

Таким образом, данный метод позволяет рассчитывать приоритеты рассматриваемых параметров процесса с точки зрения их влияния на итоговое качество, т.е. их значимость по сравнению с другими на определенном уровне иерархии. Оценка значимости параметров обеспечивает возможность их ранжирования для выявления критических параметров и разработки необходимых управленческих решений, направленных на обеспечение соблюдения требований к качеству контрейлерных перевозок. Представленная методика является универсальной и может быть использована для оценки качества перевозок различных категорий грузов. Основные отличия будут заключаться только на начальном этапе, при формировании иерархической структуры исследуемого процесса.

Библиографический список

1. *Холопов, К. В.* Зарубежный опыт и направления развития международных контейнерных перевозок в России / К. В. Холопов // *Российский внешнеэкономический вестник*. – 2011. – № 9. – С. 101–108.
2. *Siroky, J.* The Trends of Road Trailers Systems for Railways / J. Siroky // *Perner's Contacts*. – 2012. – Vol. 8, № 4. – P. 137–151.
3. *Охотников, И. В.* Проблемы развития международных транспортных коридоров и реализация транзитного потенциала России / И. В. Охотников, Л. А. Шведов // *Транспортное дело России*. – 2018. – № 5. – С. 44–45.
4. *Кряжев, А. Н.* Организация регулярного контейнерного сообщения на территории России / А. Н. Кряжев // *Транспорт Российской Федерации*. – 2016. – № 1 (62). – С. 18–21.
5. *Терентьев, В. В.* Безопасность автомобильных перевозок: проблемы и решения / В. В. Терентьев // *Надежность и качество сложных систем*. – 2017. – № 2 (18). – С. 90–94. – DOI 10.21685/2307-4205-2017-2-15.
6. *Цыганов, А. В.* Факторы качества процесса перевозки контейнеров / А. В. Цыганов // *Инженерный вестник Дона*. – 2018. – № 4 (51). – URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5357> (дата обращения 17.12.2018).
7. ГОСТ 30596-97. Услуги транспортные. Термины и определения. – Введ. 1997-01-01. – Москва : Изд-во стандартов, 1997. – 6 с.
8. ГОСТ 30595-97. Услуги транспортные. Грузовые перевозки. Номенклатура показателей качества. – Введ. 1997-01-01. – Москва : Изд-во стандартов, 1997. – 10 с.
9. *Ковалев, Г. А.* Методологические особенности организации железнодорожных контейнерных перевозок / Г. А. Ковалев, О. Н. Числов, Е. Е. Супрун // *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения*. – 2018. – № 3 (71). – С. 104–113.
10. *Скорченко, М. Ю.* Состояние и перспективы контейнерных перевозок в Российской Федерации / М. Ю. Скорченко // *Инженерный вестник Дона*. – 2017. – № 4 (47). – URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4573> (дата обращения 05.11.2018).
11. *Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года (в ред. Распоряжения Правительства РФ от 11.06.2014 г. № 1032-р)*. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/420202382> (дата обращения 20.12.2018 г.).
12. *Гришко, А. К.* Методология управления качеством сложных систем / А. К. Гришко, Н. К. Юрков, И. И. Кочегаров // *Труды Международного симпозиума Надежность и качество*. – 2014. – Т. 2. – С. 377–379.
13. *Цыганов, А. В.* Иерархическая декомпозиция качества процесса контейнерных перевозок / А. В. Цыганов // *Качество в обработке материалов*. – 2018. – № 2 (10). – С. 46–49.
14. *Metallurgy qualimetry theory design and development* / G. S. Gun, G. Sh. Rubin, M. V. Chukin, I. G. Gun, I. U. Mezin, A. G. Korchunov // *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. – 2013. – № 5 (45). – P. 67–69.
15. *Саати, Т.* Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т. Саати ; пер. с англ. Р. Г. Вачнадзе. – Москва : Радио и связь, 1993. – 278 с.
16. *Юрков, Н. К.* Методология экспертных систем в анализе надежности сложных технических систем / Н. К. Юрков, В. Б. Алмаметов, Ю. А. Држевецкий // *Труды Международного симпозиума Надежность и качество*. – 2010. – Т. 2. – С. 439–440.
17. *Саати, Т. Л.* Принятие решений при зависимостях и обратных связях: аналитические сети / Т. Л. Саати ; пер. с англ. О. Н. Андрейчиковой. – Москва : Изд-во ЛКИ, 2008. – 360 с.
18. *Литвиненко, Р. С.* Оценка влияния надежности элементов наземного городского электрического транспорта на его пропускную способность / Р. С. Литвиненко, П. П. Павлов, А. Э. Аухадеев // *Надежность и качество сложных систем*. – 2018. – № 2 (22). – С. 95–103. – DOI 10.21685/2307-4205-2018-2-13.
19. *Федорина, А. В.* Комплексный подход к внедрению контейнерных перевозок в России / А. В. Федорина, А. В. Цыганов // *Современные проблемы транспортного комплекса России*. – 2015. – № 1 (6). – С. 21–28.
20. *Онлайн-калькулятор по статистике*. – URL: <https://math.semestr.ru/gauss/ownvectors.php> (дата обращения 09.01.2019).
21. *WolframAlpha: Computational Intelligence*. – URL: <https://www.wolframalpha.com/input/?i=eigenvalues> (дата обращения 09.01.2019).

References

1. Kholopov K. V. *Rossiyskiy vneshneekonomicheskiy vestnik* [Russian foreign economic Bulletin]. 2011, no. 9, pp. 101–108. [In Russian]
2. Siroky J. *Perner's Contacts*. 2012, vol. 8, no. 4, pp. 137–151.
3. Okhotnikov I. V., Shvedov L. A. *Transportnoe delo Rossii* [Transport business of Russia]. 2018, no. 5, pp. 44–45. [In Russian]

4. Kryazhev A. N. *Transport Rossiyskoy Federatsii* [Transport Of The Russian Federation]. 2016, no. 1 (62), pp. 18–21. [In Russian]
5. Terent'ev V. V. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2017, no. 2 (18), pp. 90–94. DOI 10.21685/2307-4205-2017-2-15. [In Russian]
6. Tsyganov A. V. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Quality factors of the process of transportation of trailers]. 2018, no. 4 (51). Available at: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5357> (accessed Dec. 17, 2018). [In Russian]
7. *GOST 30596-97. Uslugi transportnye. Terminy i opredeleniya. Vved. 1997-01-01* [GOST 30596-97. Transport services. Terms and definitions. – Enter. 1997-01-01]. Moscow: Izd-vo standartov, 1997, 6 p. [In Russian]
8. *GOST 30595-97. Uslugi transportnye. Gruzovye perevozki. Nomenklatura pokazateley kachestva. Vved. 1997-01-01* [GOST 30595-97. Transport services. Freight traffic. Nomenclature of quality indicators. – Enter. 1997-01-01]. Moscow: Izd-vo standartov, 1997, 10 p. [In Russian]
9. Kovalev G. A., Chislov O. N., Suprun E. E. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of Rostov state University of railway engineering]. 2018, no. 3 (71), pp. 104–113. [In Russian]
10. Skorchenko M. Yu. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Herald of the Don]. 2017, no. 4 (47). Available at: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4573> (accessed Nov. 05, 2018). [In Russian]
11. *Transportnaya strategiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2030 goda (v red. Rasporyazheniya Pravitel'stva RF ot 11.06.2014 g. № 1032-r)* [Transport strategy of the Russian Federation for the period up to 2030 (as amended by the RF Government decree No. 1032-R of 11.06.2014).]. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/420202382> (accessed Dec. 20, 2018). [In Russian]
12. Grishko A. K., Yurkov N. K., Kochegarov I. I. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and quality]. 2014, vol. 2, pp. 377–379. [In Russian]
13. Tsyganov A. V. *Kachestvo v obrabotke materialov* [The quality in the materials handling]. 2018, no. 2 (10), pp. 46–49. [In Russian]
14. Gun G. S., Rubin G. Sh., Chukin M. V., Gun I. G., Mezin I. U., Korchunov A. G. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2013, no. 5 (45), pp. 67–69. [In Russian]
15. Saati T. *Prinyatie resheniy. Metod analiza ierarkhiy* [Decision making. Hierarchy analysis method]. Moscow: Radio i svyaz', 1993, 278 p. [In Russian]
16. Yurkov N. K., Almametov V. B., Drzhevetskiy Yu. A. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and quality]. 2010, vol. 2, pp. 439–440. [In Russian]
17. Saati T. L. *Prinyatie resheniy pri zavisimostyakh i obratnykh svyazyakh: Analiticheskie seti* [Decision making with dependencies and feedbacks: Analytical networks]. Transl. from Engl. by O. N. Andreychikova. Moscow: Izd-vo LKI, 2008, 360 p. [In Russian]
18. Litvinenko R. S., Pavlov P. P., Aukhadeev A. E. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2018, no. 2 (22), pp. 95–103. DOI 10.21685/2307-4205-2018-2-13. [In Russian]
19. Fedorina A. V., Tsyganov A. V. *Sovremennye problemy transportnogo kompleksa Rossii* [Modern problems of transport complex of Russia]. 2015, no. 1 (6), pp. 21–28. [In Russian]
20. *Onlayn-kalkulyator po statistike* [Online statistics calculator]. Available at: <https://math.semestr.ru/gauss/ownvectors.php> (accessed Jan. 09, 2019). [In Russian]
21. *WolframAlpha: Computational Intelligence*. Available at: <https://www.wolframalpha.com/input/?i=eigenvalues> (accessed Jan. 09, 2019).

Цыганов Александр Владимирович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра логистики и управления
транспортными системами,
Магнитогорский государственный
технический университет им. Г. И. Носова
(455023, Россия, г. Магнитогорск, просп. Ленина, 38)
E-mail: ciganov_av@mail.ru.

Tsyganov Aleksandr Vladimirovich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of logistics
and transportation systems management,
G. Nosov Magnitogorsk State Technical University
(455023, 38 Lenin avenue, Magnitogorsk, Russia)

Образец цитирования:

Цыганов, А. В. Использование метода анализа иерархий в управлении качеством контрейлерных перевозок / А. В. Цыганов // Надежность и качество сложных систем. – 2019. – № 2 (26). – С. 121–129. – DOI 10.21685/2307-4205-2019-2-14.