

СОДЕРЖАНИЕ

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПРОБЛЕМ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА

- Северцев Н. А., Бецков А. В., Дарьина А. Н.**
МОДЕЛИРОВАНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ СТРУКТУРНО-СЛОЖНЫХ СИСТЕМ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ
ПОКАЗАТЕЛЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ УПРАВЛЕНИИ СИСТЕМОЙ ОПЕРАТОРОМ..... 5
- Затучный Д. А.**
К ВОПРОСУ О ПРОГНОЗИРОВАНИИ ПРЕДОТКАЗОВОГО СОСТОЯНИЯ
ОБЪЕКТА ЭКСПЛУАТАЦИИ ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА..... 12
- Алексеев В. В., Зайцев А. В., Лысункин П. С.**
МЕТОДОЛОГИЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЭРГАТИЧЕСКОГО ЭЛЕМЕНТА
В ЭРГОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА..... 17

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ

- Острейковский В. А., Антонюк П. В., Антонюк А. В.**
АНАЛИЗ РАБОТОСПОСОБНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ
МОБИЛЬНЫХ БУРОВЫХ КОМПЛЕКСОВ ПО СТАТИСТИЧЕСКИМ ДАННЫМ
ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ В УСЛОВИЯХ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ..... 23
- Острейковский В. А., Соловьев Н. А., Шевченко Е. Н.**
АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ КОМПРЕССОРНЫХ
СТАНЦИЙ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ НА ЭТАПЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ..... 32
- Перевертов В. П., Пиганов М. Н., Юрков Н. К.**
МЕТОДИКА РАСЧЕТА БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕГО ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО
ЭЛЕМЕНТА КУЗНЕЧНО-ПШТАМПОВОЧНОЙ МАШИНЫ
С СИСТЕМОЙ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ..... 40
- Демидов Д. Е., Будадына Н. В.**
ПОВЫШЕНИЕ ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ..... 50
- Поршнева С. В., Будадына Н. В., Стойчин К. А., Шабров А. В.**
ОБ ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ
КОРПОРАТИВНЫХ КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ 59
- Семенец В. О., Трухин М. П.**
ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫМИ АППАРАТАМИ..... 65
- Канащенков А. И., Новиков С. В.**
ОСНОВНЫЕ МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ 71
- Кузнецов Н. С., Смогунов В. В., Фионова А. Р., Юрков Н. К.**
ГИБРИДНЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ ИНЖЕНЕРИИ
ГЕТЕРОСТРУКТУР ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ..... 85
- Адамов А. П., Семенцов С. Г., Темиров А. Т.**
БАЛАНСИРОВКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СЕНСОРОВ
В БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЯХ..... 98

ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

Ключников А. В., Васильев М. А., Патокина Н. Е., Абышев Н. А., Криковцов Д. А. КОНСТРУКЦИИ И ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ ХАРАКТЕРИСТИК ГЕОМЕТРИИ МАСС ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ.....	105
Ванцов С. В., Халявина А. А. АНАЛИЗ МЕТОДОЛОГИЙ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ	115
Адамов А. П., Адамова А. А., Семенцов С. Г., Темиров А. Т. ПРОТОКОЛЫ ОБМЕНА В БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЯХ РЕГИСТРАЦИИ СОБЫТИЙ.....	124

БЕЗОПАСНОСТЬ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

Безродный Б. Ф., Безродный И. Ф., Виноградов А. С. ОПТИМИЗАЦИЯ ПОРЯДКА ПРИМЕНЕНИЯ СРЕДСТВ И МЕРОПРИЯТИЙ ОБЕСПЕЧЕНИЯ АБСОЛЮТНОЙ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТА.....	133
Путилов В. А., Маслобоев А. В., Быстров В. В. КОМПЛЕКС ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ПОДДЕРЖКИ УПРАВЛЕНИЯ РЕГИОНАЛЬНОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ	143

ОРГАНИЗАЦИЯ И БЕЗОПАСНОСТЬ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ

Витолин С. В. ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ ИНТЕНСИВНОСТИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ НА КАЧЕСТВО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПРОБЛЕМНЫХ РЕГУЛИРУЕМЫХ ПЕРЕКРЕСТКОВ	159
---	-----

CONTENT

FUNDAMENTALS OF RELIABILITY ISSUES AND QUALITY

- Severtsev N. A., Beckov A. V., Daryina A. N.**
SECURITY MODELING OF STRUCTURALLY COMPLEX SYSTEMS AND THE DEFINITION
OF SAFETY PERFORMANCE IN THE CONTROL OF SYSTEM BY THE OPERATOR..... 5
- Zatuchny D. A.**
TO THE QUESTION ABOUT PROGNOSTICATION OF THE PRE-REFUSE STATE
OF OBJECT OF EXPLOITATION OF AIR TRANSPORT..... 12
- Alekseev V. V., Zaytsev A. V., Lysunkin P. S.**
THE METHODOLOGY FOR IMPROVING THE QUALITY OF ERGATIC ELEMENT
IN ERGOTECHNICAL SYSTEMS BASED ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE..... 17

TECHNOLOGICAL BASES OF IMPROVING THE RELIABILITY AND QUALITY OF PRODUCTS

- Ostreykovskiy V. A., Antonyuk P. V., Antonyuk A. V.**
ANALYSIS OF THE PERFORMANCE AND RELIABILITY OF MOBILE DRILLING SYSTEMS
BASED ON STATISTICAL DATA DURING OPERATION IN WESTERN SIBERIA..... 23
- Ostreykovskiy V. A., Solov'ev N. A., Shevchenko E. N.**
ANALYSIS OF THE STATUS OF PROVIDING OPERABILITY
OF COMPRESSOR STATIONS OF THE GAS PIPELINE AT THE STAGE OF OPERATION 32
- Perevertov V. P., Piganov M. N., Yurkov N. K.**
CALCULATION METHODOLOGY OF FAST ACTING ACTUATOR
FORGING-AND-STAMPING MACHINE SYSTEM, DIAGNOSTIC CONTROL..... 40
- Demidov D. E., Budyldina N. V.**
IMPROVING LIFETIME OF WIRELESS SENSOR NETWORKS USING FUZZY LOGIC..... 50
- Porshnev S. V., Budyldina N. V., Stoychin K. L., Shabrov A. V.**
THE ESTIMATION OF EFFICIENCY OF FUNCTIONING OF NETWORKS..... 59
- Semenets V. O., Trukhin M. P.**
METHODS OF CO-OPERATION WITHOUT FLAMMABLE AIRCRAFT 65
- Kanashchenkov A. I., Novikov S. V.**
BASIC METHODOLOGICAL PRINCIPLES OF DESIGNING A NEW GENERATION
OF AIRCRAFT RADAR SYSTEMS..... 71
- Kuznetsov N. S., Smogunov V. V., Fionova L. R., Yurkov N. K.**
HYBRID INTELLIGENCE ENGINEERED HETEROSTRUCTURES OF COMPUTERS 85
- Adamov A. P., Sementsov S. G., Temirov A. T.**
BALANCING THE ENERGY PERFORMANCE OF SENSORS IN WIRELESS SENSOR NETWORKS..... 98

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

- Klyuchnikov A. V., Vasil'ev M. A., Patokina N. E., Abyshev N. A., Krikovtsov D. A.**
STRUCTURES AND ENHANSMENT PROSPECTS FOR CONTROL SYSTEMS
OF THE AIRCRAFTS MASS GEOMETRY CHARACTERISTICS 105

Vantsov S. V., Khalyavina A. A.
THE ANALYSIS OF METHODOLOGIES FOR MONITORING
AND DIAGNOSING COMPLEX ELECTRONIC DEVICES.....115

Adamov A. P., Adamova A. A., Sementsov S. G., Temirov A. T.
COMMUNICATION PROTOCOLS IN WIRELESS SENSOR NETWORKS OF EVENT REGISTRATION124

SAFETY IN EMERGENCY SITUATIONS

Bezrodnyy B. F., Bezrodnyy I. F., Vinogradov A. S.
STREAMLINING USE OF FUNDS AND ACTIVITIES ENSURING
THE ABSOLUTE FIRE SAFETY OF THE OBJECT.....133

Putilov V. A., Masloboev A. V., Bystrov V. V.
SIMULATION MODEL COMPLEX FOR REGIONAL SECURITY CONTROL SUPPORT.....143

ORGANIZATION AND SAFETY OF ROAD TRAFFIC

Vitolin S. V.
EFFECT OF TRAFFIC FLOW FLUCTUATIONS ON THE QUALITY
FOR FUNCTIONING OF PROBLEM SIGNALIZED INTERSECTIONS.....159

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПРОБЛЕМ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА

FUNDAMENTALS OF RELIABILITY ISSUES AND QUALITY

УДК 338.24.01

DOI 10.21685/2307-4205-2018-3-1

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ СТРУКТУРНО-СЛОЖНЫХ СИСТЕМ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ УПРАВЛЕНИИ СИСТЕМОЙ ОПЕРАТОРОМ

N. A. Severtsev, A. V. Beckov, A. N. Daryina

SECURITY MODELING OF STRUCTURALLY COMPLEX SYSTEMS AND THE DEFINITION OF SAFETY PERFORMANCE IN THE CONTROL OF SYSTEM BY THE OPERATOR

Аннотация. Предметом фундаментально-прикладных исследований являются методы и критерии безопасности и защиты сложных технических систем (СТС), повреждение и разрушение которых ведет за собой возможность возникновения аварий и катастроф с глобальными, национальными или региональными последствиями, а также возможность больших людских или материальных потерь. При этом человек-оператор оказывается включенным в эти системы как источник опасностей и как важнейшее звено, снижающее риск возникновения этих опасностей. Для обеспечения безопасного управления работой СТС оператор должен иметь высокий уровень профессиональной подготовки. В статье рассматривается показатель уровня подготовки оператора, управляющего сложной технической системой с помощью математических методов и моделей. Предложенная методика позволяет получить количественную оценку подготовки операторов. Разработаны модели исключения ущерба исследуемой сложной человеко-машинной системы на всем жизненном цикле.

Ключевые слова: модель, ущерб, ошибки, события, вероятность, эргатическая система, безопасность, управление, оператор.

Abstract. The subject is fundamentally applied research are methods and criteria for the safety and protection of complex technical systems (STS), damage and destruction of which entails the possibility of accidents and catastrophes from global, national or regional implications, as well as the possibility of more human or material losses. When this man-cinematographer proves to be included in these systems as a source of danger and as an essential link, reducing the risk of these hazards. To ensure the safe management of SPC operator must have a high level of training. The article deals with the level of training of the operator that manages complex technical system with the help of mathematical methods and models. The proposed technique allows to obtain a quantitative estimate of training of operators. The article exceptions developed models of damage studied complex man-machine system throughout the life cycle. In the article the models of exclusion of damage of the investigated complex human-machine system on the whole life cycle are developed.

Key words: model, damage, errors, events, probability, ergatic system, security, control, operator.

Согласно основным положениям, определяющим порядок оценивания интегральных рисков жизнеобеспечения при работе с СЧМС (система-человек-машина-среда), выражение для математического ожидания случайного ущерба как дискретной случайной величины имеет вид

$$M[Y] = \sum_{i=1}^n P_i Y_i,$$

где $Y_1, \dots, Y_n, i = \overline{1, n}$ – возможные значения случайного ущерба от объекта спецтехники в процессе реализации его жизненного цикла; P_1, \dots, P_n – вероятности того, что случайный ущерб от объекта спецтехники за жизненный цикл примет значения Y_1, \dots, Y_n соответственно. Ущерб Y_1, \dots, Y_n , вызванные отказами исследуемой системы различного назначения и их последствиями, связаны не только с гибелью дорогостоящей техники и управляющих ею операторов (экипажей кораблей, самолетов, космических объектов, дежурных смен АЭС и др.), но и с разрушением среды жизнедеятельности, жертвами среди населения. Очевидно, что вероятность возникновения ущерба P_1, \dots, P_n при эксплуатации эргатических систем связана не только с безопасностью эксплуатируемой техники, но также с влиянием оператора (его профессиональной подготовки, психической устойчивостью и др.), управляющего этой техникой [1].

Обозначим через m_1 число ошибок, которое может допустить оператор за время управления СЧМС, равное t , где $t \in [0, T]$. Тогда условием успешного управления оператором будут его безошибочные действия. Обозначим событие, заключающееся в безошибочных действиях оператора, через \bar{A}_1 ($m_1 = 0$) при $t \in [0, T]$. Условие $m_1 = 0$ безопасного (безошибочного) управления СЧМС оператором определяется критерием его безопасного управления. Обозначим через m_2 число отказов СЧМС, которое может произойти за время работы, равное t , где $t \in [0, T]$. Тогда критерием безопасной работы системы будет условие $m_2 = 0$ ¹. Обозначим событие, заключающееся в безотказной работе исследуемой системы за время $t \in [0, T]$, через \bar{A}_2 ($m_2 = 0$).

Как следует из постановки задачи, безопасная работа СЧМС обеспечивается как при условии отсутствия отказов, поломок или ошибок в управлении системой оператором (предпосылок аварии – $m_1 = 0$), так и при условии предотвращения аварии (ликвидации ее предпосылок) умелыми действиями оператора, использующего резервы, заложенные в систему при ее создании – $m_2 = 0$. Событие \bar{A} , противоположное событию A , называется **успешным выполнением задачи СЧМС**, управляемой оператором, на заданном интервале времени $[0, T]$ его действий.

Выразим событие \bar{A} в виде

$$\bar{A} = \bar{A}_1 \bar{A}_2,$$

где \bar{A}_1 и \bar{A}_2 – события, состоящие в обеспечении безопасного управления СЧМС и ее безаварийной работы на интервале времени $[0, T]$. На данном этапе исследований примем допущение, что события \bar{A}_1 и \bar{A}_2 независимы. Тогда

$$P \equiv P(\bar{A}) = P(\bar{A}_1)P(\bar{A}_2)$$

или

$$P = P_{\text{он}} P_{\text{ба}}. \tag{1}$$

Здесь $P_{\text{он}} = P(\bar{A}_1)$ – вероятность безопасного управления СЧМС на интервале $[0, T]$, осуществляемого оператором, а $P_{\text{ба}} = P(\bar{A}_2)$ – вероятность безаварийной работы СЧМС на интервале

¹ При управлении СЧМС для отказа, сопряженного с последствиями, классифицируемыми соответствующими нормативными документами как поломка, авария, катастрофа, термин «безотказная работа» является синонимом «безаварийная работа».

$[0, T]$. Выражение (1) означает, что вероятность P успешного выполнения задачи системой, управляемой оператором на заданном интервале времени $[0, T]$, равна произведению вероятности $P_{\text{бп}}$ безопасного управления СЧМС на вероятность $P_{\text{ба}}$ безаварийной работы СЧМС на $[0, T]$. Вероятность P в (1) называется **основным вероятностным показателем безопасности функционирования СЧМС**, управляемой оператором [2]. Расчет каждой из составляющих основного показателя, т.е. расчет вероятностей $P_{\text{бп}}$ и $P_{\text{ба}}$, представляет собой весьма сложную задачу, решение которой будет изложено далее.

Как было отмечено, для обеспечения безопасного управления работой СЧМС оператор должен иметь высокий уровень профессиональной подготовки. Рассмотрим показатель уровня подготовки оператора, управляющего сложной человеко-машинной системой. В качестве исходной модели примем разработанную в функциональном анализе модель нормированного векторного пространства, а также векторного пространства со скалярным произведением векторов. Рассмотрим пространство $E_{m,n}$ всех матриц A размером $m \times n$. Элементами этого пространства являются матрицы. В пространстве $E_{m,n}$ можно ввести понятие расстояния

$$\rho(A, B) = \|A - B\|, \quad (2)$$

между двумя любыми элементами A и B из $E_{m,n}$, т.е. между двумя любыми матрицами A и B одинаковой размерности $m \times n$. В (2) использовано обозначение $\|A - B\|$ для так называемой нормы разности двух элементов A и B из $E_{m,n}$. При этом норма $\|X\|$ элемента $X \in E_{m,n}$ определяется как функция $X \rightarrow \|X\|$, удовлетворяющая условиям:

- 1) $\|X\| = 0 \Leftrightarrow X = 0, \quad 0 \in E_{m,n}$;
- 2) $\|\lambda X\| = |\lambda| \|X\|, \quad \forall \lambda$;
- 3) $\|X + Y\| \leq \|X\| + \|Y\|, \quad \forall X, Y \in E_{m,n}$.

Таким образом, расстояние между двумя матрицами можно ввести как норму, т.е. выбирая функцию $X \rightarrow \|X\|$, удовлетворяющую аксиомам нормы, можно найти расстояние между двумя матрицами.

Часто для задания нормы элемента пространства $E_{m,n}$ используют понятие скалярного произведения двух любых элементов $X, Y \in E_{m,n}$, под которым понимается функция $\pm(X, Y)$, удовлетворяющая следующим аксиомам скалярного произведения:

- 1) $(X, X) \geq 0$, причем $(X, X) = 0 \Leftrightarrow X = 0, \quad 0 \in E_{m,n}$;
- 2) $(\lambda X, Y) = \lambda(X, Y), \quad \forall \lambda$;
- 3) $(X + Y, Z) = (X, Z) + (Y, Z)$.

Пусть выбрана функция скалярного произведения. Тогда аксиомы нормы выполняются, если положить

$$\|X\| = \sqrt{(X, X)}.$$

Тогда для нахождения расстояния между двумя матрицами можно использовать соотношение

$$\rho(A, B) = \|A - B\| = \sqrt{(X, X)}, \quad (3)$$

где $X = A - B$.

Применение формулы (3) предполагает, что известно соотношение для нахождения скалярного произведения двух матриц. Покажем, что если $A = (a_{ij})$ и $B = (b_{ij})$ – две матрицы из $E_{m,n}$, составленные из элементов a_{ij} и b_{ij} , то скалярное произведение (A, B) указанных матриц может быть найдено по формуле

$$(A, B) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m a_{ij} b_{ij}. \tag{4}$$

Действительно, $(A, A) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m a_{ij}^2 \geq 0$, причем знак равенства здесь достигается лишь для нулевой матрицы A . Кроме того, для любого числа λ выполняется условие

$$(\lambda A, B) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \lambda a_{ij} b_{ij} = \lambda \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m a_{ij} b_{ij} = \lambda (A, B).$$

Таким образом, первые две аксиомы скалярного произведения выполняются. Легко проверить, что третья аксиома при выборе скалярного произведения двух матриц в форме (4) также верна. Следовательно, для установления расстояния между двумя матрицами можно использовать соотношения (3) и (4), из которых получим расчетную формулу

$$\rho(A, B) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (a_{ij} - b_{ij})^2}. \tag{5}$$

Из тех же соотношений (4) и (5) получим формулу нахождения Евклидовой нормы матрицы $A \in E_{m,n}$

$$\|A\| = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m a_{ij}^2}. \tag{6}$$

Подчеркнем, что аксиомам нормы и аксиомам скалярного произведения могут удовлетворять различные выражения для нормы и скалярного произведения. Поэтому формула (6) представляет собой одно из возможных выражений для расстояния между матрицами. Оно может называться Евклидовым расстоянием, так как в случае, когда A и B – матрицы-столбцы (векторы), выражение (5) совпадает с известным соотношением для расчета Евклидова расстояния между двумя точками n -мерного пространства.

Пусть $T = (t_{ij})$ – матрица задания (конкретно матрица учебного плана подготовки оператора), а $T_0 = (\tau_{ij})$ – матрица ответов (например, на экзамене или зачете) оператора. Тогда уровень подготовки оператора может быть оценен с помощью расстояния ρ между T и T_0 . Чем меньше это расстояние, тем выше уровень подготовки оператора, а значит, тем выше качество процесса его обучения, например, в учебном центре, если программа обучения проработана на уровне современных требований.

В результате изложенных построений приходим к следующему заключению. Одним из количественных показателей уровня подготовки оператора(ов) для управления СЧМС или СТС может служить функция расстояния между матрицей T задания программы (плана) обучения и матрицей T_0 – ответов оператора по усвоению этого задания, т.е. ответов на вопросы при сдаче зачета (экзамена):

$$\rho(T, T_0) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (t_{ij} - \tau_{ij})^2}. \tag{7}$$

Уменьшение $\rho(T, T_0)$ свидетельствует о повышении уровня подготовки оператора(ов) для любого типа сложной человеко-машинной системы.

Подчеркнем, что выбор функции расстояния не однозначен, а значит, расстояние $\rho(T, T_0)$ можно выбрать и иначе, не только в виде формулы (7). При любом таком выборе аксиомы нормы выполняются, что приводит к выполнению следующих свойств расстояния:

- 1) $\rho(A, B) = \rho(B, A)$;

$$2) \rho(A, B) = 0 \Leftrightarrow A = B ;$$

$$3) \rho(A, B) + \rho(A, C) \geq \rho(B, C) .$$

Возникает вопрос: как скажутся различия в выборе функции расстояния, удовлетворяющей условиям 1–3, на результатах применения показателя вида (7) для оценки уровня освоения и качества учебного плана (программы)? Ответ на этот вопрос – отдельное исследование. В последние годы в теории нормированных пространств установлено интересное неравенство [3]

$$\|A - B\| \geq \xi_0 , \quad (8)$$

где $\xi_0 = \gamma \max(\|A\|, \|B\|)$, причем $A, B \in E_{m,n}$.

Кроме того, в формулу (8) введено обозначение $\max(\|A\|, \|B\|)$, выражающее большую из двух норм $\|A\|$ и $\|B\|$ элементов (векторов) A и B из $E_{m,n}$, а γ – число, равное [4]

$$\gamma = \frac{1}{2} \sin \alpha ,$$

где $\sin \alpha$ – синус угла между векторами A и B пространства $E_{m,n}$.

Известно, что $\cos \alpha$ – косинус угла между векторами A и B выражается в виде отношения их скалярного произведения к произведению их норм, т.е. [5]

$$\cos \alpha = \frac{(A, B)}{\|A\| \cdot \|B\|} .$$

Отметим, что из формулы (8) следует важный вывод: показатель (7) расхождения между матрицей T задания и матрицей T_0 ответов оператора(ов) при $T \neq T_0$ не может быть меньшим, чем величина ξ_0 , т.е.

$$\rho(T, T_0) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (t_{ij} - \tau_{ij})^2} \geq \xi_0 ,$$

где ξ_0 – нижняя граница расхождения, равная

$$\xi_0 = \frac{1}{2} \|T\| \sin \alpha .$$

При этом, учитывая, что $\sin \alpha = \pm \sqrt{1 - \cos^2 \alpha}$, получаем $\sin \alpha = \pm \sqrt{1 - \left(\frac{(T, T_0)}{\|T\| \cdot \|T_0\|} \right)^2}$.

В результате получается, что выполняется соотношение $T_0 \leq T_1$, означающее, что ответы оператора(ов), измеренные в баллах, не могут быть выше, чем балльная сложность решаемых задач, где $T_1 = \max(\|T\|, \|T_0\|)$ [6].

Таким образом, в качестве уточненного показателя подготовки оператора для обслуживания сложной системы может быть использован следующий критерий [7–8]:

$$\hat{\rho}(T, T_0) = \rho(T, T_0) - \xi_0 .$$

В отличие от показателя $\rho(T, T_0)$ минимальное значение $\hat{\rho}(T, T_0)$ при $T \neq T_0$ может быть равно нулю.

Библиографический список

1. Северцев, Н. А. Введение в теорию безопасности / Н. А. Северцев, А. В. Бецков. – М. : ВЦ им. А. А. Дородницына РАН, 2008. – 176 с.
2. Северцев, Н. А. Системный анализ теории безопасности. – М. : Изд-во МГУ, 2009. – 452 с.

3. Северцев, Н. А. Моделирование безопасности функционирования динамических систем / Н. А. Северцев, А. В. Бецков. – М. : ТЕИС, 2015. – 328 с.
4. Северцев, Н. А. Системный анализ определения параметров состояния и параметры наблюдения объекта для обеспечения безопасности / Н. А. Северцев // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 1. – С. 4–10.
5. Бецков, А. В. Безопасность и надежность системы защиты объекта / А. В. Бецков // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 1. – С. 35–40.
6. Катулев, А. Н. Алгоритм и результаты оценки структурной устойчивости функционирования нелинейных автономных динамических систем / А. Н. Катулев, Н. А. Северцев // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2016. – Т. 1. – С. 68–72.
7. Северцев, Н. А. Полумарковская модель исследования безопасности систем. Безопасность и надежность системы как объекта, имеющего систему защиты / Н. А. Северцев, А. В. Бецков, Ю. В. Лончаков // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 1. – С. 2–8.
8. Юрков, Н. К. К проблеме обеспечения глобальной безопасности / Н. К. Юрков // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2012. – Т. 1. – С. 6–7.

References

1. Severtsev N. A., Beckov A. V. *Vvedenie v teoriyu bezopasnosti* [Introduction to the theory of security]. Moscow: VC im. A. A. Dorodnicyna RAN. 2008, 176 p.
2. Severtsev N. A. *Sistemnyj analiz teorii bezopasnosti* [System analysis of the theory of security]. Moscow: Izd-vo MGU, 2009, 452 p.
3. Severtsev N. A., Beckov A. V. *Modelirovanie bezopasnosti funkcionirovaniya dinamicheskikh sistem: Nauchnoe izdanie* [Modeling the safety of the functioning of dynamic systems: Scientific publication]. Moscow: TEIS, 2015, 328 p.
4. Severtsev N. A. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem* [Reliability and quality of complex systems]. 2013, no. 1, pp. 4–10.
5. Beckov A. V. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem* [Reliability and quality of complex systems]. 2013, no. 1, pp. 35–40.
6. Katulev A. N., Severtsev N. A. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Works of the international symposium Reliability and quality]. 2016, no. 1, pp. 68–72.
7. Severtsev N. A., Betskov A. V., Lonchakov Yu. V. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem* [Reliability and quality of complex systems]. 2014, no. 1, pp. 2–8.
8. Yurkov N. K. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Works of the international symposium Reliability and quality]. 2012, vol. 1, pp. 6–7.

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: safstest@mail.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

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,
Russian Academy of the interior Ministry
(125171, 8 Zoi i Aleksandra Kosmodem'yanskikh
street, Moscow, Russia)

Дарьина Анна Николаевна

кандидат физико-математических наук, доцент,
ведущий научный сотрудник,
Федеральный исследовательский центр
«Информатика и Управление»
Российской Академии Наук
(119333, Россия, г. Москва, ул. Вавилова, 44, корп. 2)
E-mail: daryina@ccas.ru

Darina Anna Nikolaevna

candidate of physical and mathematical sciences,
associate professor, senior researcher,
Federal research center
«Computer science and control» of RAS
(119333, 2, 44 Vavilova street, Moscow, Russia)

УДК 338.24.01

Северцев, Н. А.

Моделирование безопасности структурно-сложных систем и определение показателя безопасности при управлении системой оператором / Н. А. Северцев, А. В. Бецков, А. Н. Дарьина // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 3 (23). – С. 5–11. – DOI 10.21685/2307-4205-2018-3-1.

Д. А. Затучный

К ВОПРОСУ О ПРОГНОЗИРОВАНИИ ПРЕДОТКАЗОВОГО СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТА ЭКСПЛУАТАЦИИ ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА

D. A. Zatuchny

TO THE QUESTION ABOUT PROGNOSTICATION OF THE PRE-REFUSE STATE OF OBJECT OF EXPLOITATION OF AIR TRANSPORT

Аннотация. Приведен подход к решению актуальной проблемы – прогнозированию предотказового состояния различных объектов эксплуатации. Приведены факторы, которые необходимо учитывать для прогнозирования развития предотказового состояния объектов эксплуатации воздушного транспорта. Для оценки масштаба проблем, вызванных ситуацией, связанной с развитием предотказовых ситуаций, проведена иллюстрация на примере радиоэлектронного оборудования. Рассмотрены различные состояния радиоэлектронного оборудования. Приведена математическая модель развития предотказового состояния. Дана рекомендация, что для расчета производственно-технологических отклонений и допусков следует использовать метод разложения функций в ряды и метод Монте-Карло. Сделан вывод о возможности выполнения расчета всех вероятностных характеристик для процесса развития предотказового состояния на этапе разработки и определения расчетно-эксплуатационных характеристик объектов эксплуатации воздушного транспорта. Сделан вывод об ограниченности объема информации, которую можно использовать для прогнозирования предотказового состояния объекта эксплуатации. Приведены три условия, при которых информацию, полученную в ходе испытаний аналогичных объектов, можно использовать.

Ключевые слова: предотказовое состояние, эксплуатация воздушного транспорта, допуск, вероятностная характеристика, состояние радиоэлектронного оборудования.

Abstract. Going near the decision of issue of the day is resulted in this article – to prognostication of the pre-refuse state of different objects of exploitation. Factors which must be taken into account for prognostication of development of the pre-refuse state of objects of exploitation of air transport are resulted. For the estimation of scale of problems, caused a situation, related to development of pre-refuse situations, illustration is conducted on the example of radio electronic equipment. The mathematical model of development of the pre-refuse state is resulted. Recommendation is given, that for the calculation of production-technological rejections and admittances it is necessary to use the method of decomposition of functions in rows and method of Monte Carlo. A conclusion is done about possibility of implementation of calculation of all probabilistic descriptions for the process of development of the pre-refuse state on the stage of development and determination of calculation-operating descriptions of objects of exploitation of air transport. A conclusion is done about narrow-mindedness of volume of information which can be used for prognostication of the pre-refuse state of object of exploitation. Three conditions are resulted, at which information, got during the tests of analogical objects, it is possible to use.

Key words: pre-refuse state, exploitation of air transport, admittance, probabilistic description, state of radio electronic equipment.

Введение

Свойства и характеристики объектов эксплуатации воздушного транспорта могут быть описаны набором различных параметров. Последние характеризуются как своими случайными начальными значениями (отклонениями), так и случайными изменениями во времени, возникающими вследствие внешних воздействий и протекающих в элементах оборудования процессов износа. Управление состоянием сложных систем, к каковым относятся объекты эксплуатации воздушного транспорта, по элементам осуществляется путем некоторых целенаправленных действий, на основе получаемой или рабочей информации о состоянии системы и ее элементов, а также на основе имеющейся априорной информации об их свойствах, особенностях и командах, поступающих от системы [1].

Для описания процессов управления обычно опираются на системный подход, при котором исследуемые явления, системы, объекты, устройства и т.п. рассматриваются комплексно как слож-

ные системы. Под сложной системой понимается совокупность подсистем и множества элементов разной физической природы и со случайными параметрами, находящимися в сложном взаимодействии и развитии при наличии внешних воздействий и связей. При этом то или иное устройство или сама система не могут рассматриваться только с позиций алгоритмов, работы, принципа действия, функциональных и принципиальных схем, при этом обязательно должны учитываться как развитие и износ систем, так и ее условия эксплуатации.

Проблемы, связанные с развитием предотказовых ситуаций

Для прогнозирования развития предотказового состояния объектов эксплуатации воздушного транспорта необходимо учитывать следующие аспекты [2]:

- закономерности изменения состояния объектов эксплуатации воздушного транспорта и его элементов в процессе функционирования (в силу особенностей и технической реализации современной аппаратуры и технологии ее изготовления эти закономерности являются вероятностно-статистическими. Они могут относиться к полному прекращению действия оборудования (внезапные отказы) или к изменению его параметров вследствие дрейфа, старения, деградации и т.п.);

- закономерности влияния изменения состояния объектов эксплуатации воздушного транспорта и его элементов (их параметров и характеристик) на параметры и характеристики информационной системы, в части определения допустимых значений параметров системы;

- методы контроля текущего состояния объектов эксплуатации воздушного транспорта и его элементов, а также методы выявления предотказовых и отказовых ситуаций, как при внезапных отказах, так и при «дрейфе» параметров (постепенные отказы, параметрические отказы, старение, деградация, износ);

- методы и возможности индивидуального прогнозирования состояния и надежности объектов эксплуатации воздушного транспорта и их элементов.

Совершенно очевидно, что перечисленные выше аспекты в общем случае находятся в сложной взаимозависимости.

Однако определяющее влияние на эксплуатационные свойства объектов эксплуатации воздушного транспорта, а стало быть, на эффективность управления, оказывают закономерности изменения его состояния в процессе функционирования, т.е., в конечном счете, в процессе износа.

Именно эти закономерности определяют качество функционирования объектов эксплуатации воздушного транспорта и оказывают определяющее влияние на методы контроля, регулировок, диагностирования, подстроек и поиска неисправностей, содержание и периодичность профилактических работ, на сложность, трудоемкость и эффективность всего комплекса мероприятий, проводимых в процессе технической эксплуатации, т.е. на весь комплекс вопросов, связанных с процессом управления состоянием объектов эксплуатации воздушного транспорта.

Чтобы оценить масштаб проблем, вызванных ситуацией, связанной с развитием предотказовых ситуаций, приведем иллюстрацию на примере радиоэлектронного оборудования (РЭО).

Возможны следующие состояния РЭО [3]:

- 1) работает, исправен;
- 2) исправен, контролируется;
- 3) неисправен, на текущем ремонте;
- 4) свернут, снят с дежурства;
- 5) неисправен, в среднем ремонте;
- 6) неисправен, в капитальном ремонте;
- 7) свернут, списывается;
- 8) разворачивается, вводится в строй;
- 9) находится на текущем техническом обслуживании;
- 10) находится на техническом обслуживании средней периодичности;
- 11) находится на техническом обслуживании большой периодичности;
- 12) простаивает в ожидании запасной детали, необходимой для восстановления утраченной работоспособности.

Как видно, из 12 возможных состояний, девять однозначно могут быть отнесены к предотказовому состоянию.

Математическое описание развития предотказовой ситуации

Квазидетерминированные модели удобно использовать для расчета эксплуатационных характеристик объектов эксплуатации воздушного транспорта и его элементов на этапе разработки. Очевидна важность получения на этом количественного описания эксплуатационных характеристик, что должно позволить принимать обоснованные решения по принципу действия, схемам и конструкции оборудования. Вместе с тем очевидны и имеющиеся трудности, так как само оборудование еще не изготовлено (или имеется несколько экземпляров опытных образцов), а поэтому испытания не могут дать объемного представления об эксплуатационных характеристиках.

Тем не менее на этапе разработки можно располагать вероятностным описанием элементов или простейших устройств, основываясь на результатах исследований, проведенных с ними при предшествующих разработках, или проведя их в процессе данной разработки, поскольку по затратам времени и средств это значительно проще, чем испытания всего оборудования.

Предположим, что функциональные зависимости, дающие связь между первичными параметрами x_i и вторичными параметрами, т.е. параметрами устройств y получены аналитически или из опыта [4]

$$y = f(x_1 \dots x_i \dots x_k). \tag{1}$$

Такие зависимости или расчетные формулы широко используются при выполнении обычных расчетов. Если x_i рассматривать как случайные величины или случайные функции $x_i \rightarrow \tilde{x}_i \rightarrow \tilde{x}_i(t)$, то прямой расчет оказывается невозможным, так как известны не значения x_i или $x_i(t)$, а их функции распределения $W(x_1 \dots x_i \dots x_k)$ или $W(x_1 \dots x_i \dots x_k t)$, которые не могут быть подставлены в формулу (1). Кроме того, при случайных x_i параметр y также оказывается случайным, а поэтому необходимо искать не его конкретное значение, а вероятностные характеристики $W(y), m_1(y)$ и $D(y)$ или $W(yt), m_1(yt)$ и $D(yt)$, что выражением (1) не предусмотрено.

Известно, что для строгого решения этой задачи необходимо выполнить функциональные преобразования совокупности случайных величин. Это связано со значительными, а иногда и непреодолимыми математическими трудностями. Поэтому целесообразно использовать приближенные методы. Это даст возможность решать рассматриваемую задачу в двух основных вариантах: расчет свойств аппаратуры как объекта производства (отклонения при изготовлении, допуска и т.п.) и расчет эксплуатационных свойств.

Для расчета производственно-технологических отклонений и допусков можно использовать метод разложения функций в ряды и метод Монте-Карло.

Рассмотрим принципы расчета эксплуатационных свойств объектов эксплуатации воздушного транспорта. Для этого необходимо найти вероятностное описание для различных моментов или интервалов времени $W(y, t)$ или $W(y_1 y_2 \dots t_1 t_2 \dots)$ и вероятностное описание времени достижения границы $W(t_{gr}, y_{gr})$. Строгое решение этой задачи еще более сложно, чем для отклонений при изготовлении.

Поэтому для расчета эксплуатационных характеристик воспользуемся приближенным методом, основанным на одной из квазидетерминированных моделей, т.е. линейной модели [5]. Положим, что

$$x_i(t) = x_{i0} (1 + \tilde{\alpha}_{xi} t), \tag{2}$$

причем известны $W(\alpha_{xi}), m_1(\alpha_{xi})$ и $D(\alpha_{xi})$.

Из формулы (2) следует, что $\alpha_{xi} = \frac{dx_i(t)}{dt} \times \frac{1}{x_{i0}}$.

Для выходного параметра также примем линейную квазидетерминированную модель

$$\tilde{y}(t) = y_0 (1 + \tilde{\alpha}_y t) \text{ и } \alpha_y = \frac{dy(t)}{dt} \times \frac{1}{y_0}. \tag{3}$$

Вероятностное описание для $\tilde{\alpha}_y$ неизвестно, и его надлежит выразить через $\tilde{\alpha}_{x_i}$. Продифференцировав (1), получим

$$\frac{dy}{dt} = \sum_{i=1}^k \frac{df}{dx_i} \times \frac{dx_i}{dt}. \quad (4)$$

Полагая, что отклонение переменных ограничено, производную $\frac{df}{dx_i}$ можно рассматривать в точке $x_i = x_{i0}$. Умножим левую и правую части на $\frac{1}{y_0}$, а в правую введем множитель $\frac{x_{i0}}{x_{i0}}$. Это приводит к следующему равенству:

$$\tilde{\alpha}_y = \frac{1}{y_0} \frac{dy}{dt} = \sum_{i=1}^k A_i \tilde{\alpha}_{x_i}, \quad (5)$$

где $A_i = \left. \frac{df}{dx_i} \right|_{x_i \rightarrow x_{i0}} \frac{x_{i0}}{y_0}$ – коэффициенты влияния, которые можно найти, например, дифференцированием функции (1).

Существует много аналитических, вычислительных и экспериментальных методов получения A_i , на которых не останавливаемся, поскольку они изложены в литературе.

Пользуясь выражением (5) и зная вероятностное описание α_{x_i} , а именно: $m_1(\alpha_{x_i})$ и $D(\alpha_{x_i})$, можно найти вероятностное описание α_y , а именно: $m_1(\alpha_y)$ и $D(\alpha_y)$:

$$\begin{cases} m_1(\alpha_y) = \sum_{i=1}^k A_i m_1(\alpha_{x_i}) \\ D(\alpha_y) = \sum_{i=1}^k A_i^2 D(\alpha_{x_i}) \end{cases}. \quad (6)$$

В связи с тем, что $\tilde{\alpha}_y$ получается в результате суммирования, как это следует из формулы (1), можно ожидать, что $W(\alpha_y)$ имеет тенденцию к нормализации. Изменяя величину и знак A_i , а также величину и знак $m_1(\alpha_{x_i})$, можно добиться того, чтобы $m_1(\alpha_y) \rightarrow 0$, т.е. осуществить компенсацию. Однако она относится только к средним значениям. Величина дисперсии $D(y)$ не может подвергаться компенсации, так как A_i^2 и $D(\alpha_{x_i})$ всегда положительны. Более того, добавление компенсирующих элементов может увеличить дисперсию $D(y)$. Это существенно ограничивает реальные возможности компенсации, поскольку индивидуальный подбор во многих случаях неприемлем из-за значительных затрат.

Как только из формулы (6) найдено вероятностное описание для α_y , квазидетерминированная модель (1) полностью определена, и можно выполнить расчет всех вероятностных характеристик для процесса $\tilde{y}(t)$ на этапе разработки, определить расчетно-эксплуатационные характеристики объектов эксплуатации воздушного транспорта и принять решение о приемлемости результатов или о необходимости доработки схемы, конструкции и используемых элементов, не проводя затрат на разработку чертежей, изготовление и испытание устройств.

Если использовать более сложные квазидетерминированные модели (полиномиальные, логарифмические, экспоненциальные), то расчеты существенно усложняются.

Заключение

Поскольку прогноз предотказового состояния объекта эксплуатации воздушного транспорта носит вероятностный характер, то большое внимание должно быть уделено объему информации, необходимой для оценки вероятности отказа.

При этом следует отметить, что временной ресурс, отведенный на испытания подобных систем не очень велик, и поэтому для расчета надежности обычно имеется не очень большая выборка по объему испытаний и количеству отказов. Данные по испытаниям систем, аналогичным исследуемой, можно использовать только при наличии трех условий:

- 1) одинаковая элементная база этих систем и исследуемой;
- 2) одинаковая технологическая база;
- 3) одинаковые условия эксплуатации.

Библиографический список

1. *Затучный, Д. А.* К вопросу о достоверности передаваемой информации в режиме автоматического зависимого наблюдения / Д. А. Затучный // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2016. – Т. 1. – С. 225–226.
2. *Затучный, Д. А.* Статистическая оценка достоверности навигационной информации, передаваемой с борта воздушного судна в режиме автоматического зависимого наблюдения / Д. А. Затучный // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2016. – Т. 1. – С. 54–56.
3. *Затучный, Д. А.* Повышение точности оценки достоверности информации, передаваемой при автоматическом зависимом наблюдении, на основе анализа качества дополнительных данных / Д. А. Затучный // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2016. – Т. 1. – С. 226–229.
4. *Недельский, М. Н.* Применение квазидетерминированных моделей для оценки степени деградации эксплуатируемых авиационных систем / М. Н. Недельский // Научный Вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. – 2008. – № 126. – С. 36–39.
5. *Недельский, М. Н.* Прогнозирование процессов деградации элементов авиационных систем / М. Н. Недельский // Научный Вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. – 2009 – № 139. – С. 54–58.

References

1. *Zatuchny D. A. Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma Nadyozhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2016, vol. 1, pp. 225–226.
2. *Zatuchny D. A. Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma Nadyozhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2016, vol. 1, pp. 54–56.
3. *Zatuchny D. A. Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma Nadyozhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2016, vol. 1, pp. 226–229.
4. *Nedel'skij M. N. Nauchnyj Vestnik MGTUGA* [Scientific Bulletin of the Moscow state technical University of civil aviation]. 2008, no. 126, pp. 36–39.
5. *Nedel'skij M. N. Nauchnyj Vestnik MGTUGA* [Scientific Bulletin of the Moscow state technical University of civil aviation]. 2009, no. 139, pp. 54–58.

Затучный Дмитрий Александрович
кандидат технических наук, профессор,
кафедра вычислительных машин, комплексов,
систем и сетей,
Московский государственный технический
университет гражданской авиации
(125993, Россия, г. Москва,
Кронштадтский бульвар, 20)
E-mail: zatuch@mail.ru

Zatuchnyy Dmitriy Aleksandrovich
candidate of technical sciences, professor,
sub-department of calculable machines,
complexes, systems and networks,
Moscow State Technical University of Civil Aviation
(125993, 20 Kronshtadtskiy avenue, Moscow, Russia)

УДК 621.396.98.004.1

Затучный, Д. А.

К вопросу о прогнозировании предотказового состояния объекта эксплуатации воздушного транспорта / Д. А. Затучный // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 3 (23). – С. 12–16. – DOI 10.21685/2307-4205-2018-3-2.

В. В. Алексеев, А. В. Зайцев, П. С. Лысункин

МЕТОДОЛОГИЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЭРГАТИЧЕСКОГО ЭЛЕМЕНТА В ЭРГОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

V. V. Alekseev, A. V. Zaytsev, P. S. Lysunkin

THE METHODOLOGY FOR IMPROVING THE QUALITY OF ERGATIC ELEMENT IN ERGOTECHNICAL SYSTEMS BASED ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Аннотация. Предлагаемая методология позволяет реализовать математическое и программное обеспечение эрготехнических систем для подсистемы контроля и информационного воздействия на эргатический элемент и обеспечивает повышение уровня профессиональной подготовки специалистов по эксплуатации технических систем. Методология построена на применении математической модели с интегрированной подсистемой контроля и информационного воздействия на эргатический элемент.

Ключевые слова: эрготехническая система, сложная система, эргатический элемент, учебная задача, информационная модель, искусственный интеллект, критерий.

Abstract. The proposed methodology allows to implement mathematical and software for the subsystem of control and information impact on the ergatic element and provides an increase in the level of training of specialists in the operation of any technical systems. The methodology is based on the application of a mathematical model with an integrated subsystem of control and information impact on the ergatic element.

Key words: ergo technical system, a complex system ergatic element, learning task, information model, artificial intelligence, criterion.

Актуальность

Развитие существующих эрготехнических систем (ЭТС) сопровождается расширением областей их применения.

Основными направлениями совершенствования и создания таких систем являются [1, 2]:

- изучение и исследование космоса;
- беспилотные летательные аппараты;
- роботизированные комплексы.

Характерными чертами, присущими этим системам, является присутствие человека (оператора) как неотъемлемой части (элемента) системы в целом, программно-технической составляющей и искусственного интеллекта (ИИ), основными элементами которого являются база знаний и интеллектуальный интерфейс. Именно искусственный интеллект играет важную роль при функционировании эрготехнических систем. Эти системы берут на себя объем работы, ранее недоступный человеку, но для своей эксплуатации требуют серьезных специальных знаний. Ввиду того, что уровень подготовки операторов разный (базовый уровень подготовки, стаж работы, психофизиологические качества и др.), то и уровень выполнения поставленных задач применительно к данной ЭТС существенно отличается. Для современных эрготехнических систем важно эффективное функционирование системы в целом, поэтому именно качество подготовки оператора выступает на первый план.

ЭТС структурно построены по схожему принципу и состоят из следующих элементов:

- подсистема принятия решения;
- информационная подсистема;
- подсистема управления;
- подсистема моделирования объекта;
- подсистема адаптации.

Информационная подсистема выполняет функцию контроля технического состояния системы и представляет собой набор датчиков и соответствующих алгоритмов, которые выдают точную информацию о текущем техническом состоянии элементов системы.

Подсистема принятия решения выходит на первый план при функционировании системы в целом, так как именно здесь оператор (эргатический элемент (ЭЭ)) принимает либо верное, либо ошибочное решение по выбору наилучшего варианта выполнения поставленной задачи.

Многочисленные исследования показывают, что лица, принимающие решения без дополнительной информационной интеллектуальной поддержки (воздействия), используют упрощенные, а иногда и противоречивые решающие правила.

Это обусловлено тем, что средств контроля действий человека и соответственно средств информационного воздействия на него при необходимости в составе ЭТС на сегодняшний день практически нет. Контроль правильности действий оператора сегодня осуществляется по результату выполнения поставленной задачи (к примеру бортовой регистратор на воздушных судах включен в систему объективного контроля). Соответственно, в современных ЭТС фиксируется результат выполненной задачи оператором, но практически нет возможности воздействовать на эргатический элемент для улучшения эксплуатационных характеристик системы в режиме реального времени в случае его неверных действий для предотвращения срыва поставленной задачи. Конечно, частичные воздействия и контроль сегодня выполняют средства освоения техники, различные тренажеры, но основными их недостатками является то, что все эти средства находятся в отрыве от самой системы и финансовые затраты на закупку и эксплуатацию этих средств значительно высоки. К тому же в условиях быстро развивающихся технических возможностей современных ЭТС необходимо модернизировать, а в некоторых случаях создавать абсолютно новые тренажерные средства, что также приводит к финансовым расходам.

Формулировка задачи

Научным решением задачи организации контроля действий и информационного воздействия на оператора является интегрирование в уже существующую структуру ЭТС специального режима контроля и информационного воздействия на ЭЭ, который реализуется в виде дополнительной подсистемы. Модель ЭТС с интегрированной подсистемой контроля и информационного воздействия (ПКИИВ) на ЭЭ представлена на рис. 1.

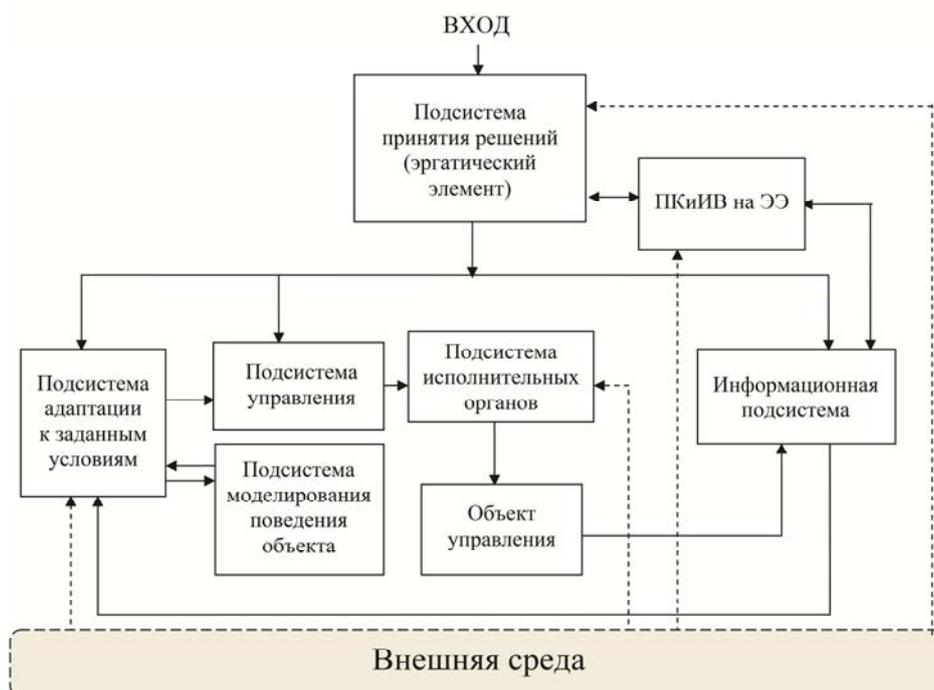


Рис. 1. Модель ЭТС с интегрированной подсистемой контроля и информационного воздействия (ПКИИВ) на ЭЭ

Примером внедрения схожего режима в ЭТС является комплексная система руководства полетами (КСРП-А). Но в данном случае специальный режим применяется лишь только к конкретной ЭТС и ее узкому перечню решаемых задач.

Решение задачи

Предлагаемая методология повышения качества ЭЭ в ЭТС на основе искусственного интеллекта позволяет реализовать математическое и программное обеспечение для подсистемы контроля и информационного воздействия на ЭЭ, которое интегрируется в любую программную среду.

Данная методология основана на обобщенной математической модели ЭЭ, приведенной в работе [3].

На этой основе разработана математическая модель ЭЭ, реализующая утверждение, что процесс решения человеком какой-либо задачи состоит в применении операции «И» (ИЛИ) для выработки управления путем его моделирования на основе известных решений типовых задач. Деятельность ЭЭ в контуре управления функционированием ЭТС рассматривается как процесс преобразования некоторого исходного состояния технической системы в состояние, обеспечивающее выполнение функциональных задач с требуемым качеством.

В соответствии с этим задача обеспечения человеком-оператором требуемого качества функционирования ЭТС представлена кортежем Z :

$$Z = \langle P, M_{\text{акт}}, M_{\text{тр}} \rangle,$$

где P – алгоритм действий для перевода ЭТС из активного состояния в требуемое; $M_{\text{акт}}$ – текущая (активная), т.е. имеющаяся в рассматриваемый момент времени, информационная модель технического состояния (качества функционирования) системы; $M_{\text{тр}}$ – информационная модель требуемого технического состояния системы с атрибутами, характеризующими ее нормальное состояние.

В процессе функционирования системы специалисту необходимо сравнивать имеющуюся в рассматриваемый момент времени информационную модель состояния (качества функционирования) ЭТС с информационной моделью требуемого состояния системы.

Именно методология повышения качества эргатического элемента в ЭТС помогает формировать верную модель системы и сравнивать ее с требуемой.

Для обеспечения функционирования подсистемы контроля и информационного воздействия на ЭЭ разработана модель автоматизированного выбора задачи для информационного воздействия на эргатический элемент сложной системы.

Сам процесс выбора верного решения является достаточно сложной итерационной процедурой. Процесс начинается с первоначальной формулировки учебной задачи (УЗ). Эта формулировка позволяет приступить к определению цели и критериев, формированию ограничений, составлению списка возможных вариантов решения. На этом заканчивается 1-й этап. Вся эта работа позволяет уточнить и конкретизировать поставленную УЗ. После этого последовательно разрабатываются постановка наиболее верного решения, математическая модель, выбирается метод принятия решений и разрабатывается алгоритм решения. Проводимый в заключение 2-го этапа анализ решения, полученного по результатам работы алгоритма, может привести либо к пересмотру УЗ и, следовательно, к повторению 1-го и 2-го этапов, либо к пересмотру постановки наиболее верного решения и, следовательно, к повторению только 2-го этапа. Указанные возвраты могут быть и неоднократными. В результате переходят к окончательному принятию решения о выборе УЗ.

Для выбора наилучшего варианта УЗ в предложенной модели использован критериальный подход [4, 5].

Алгоритм реализации модели автоматизированного выбора задачи для информационного воздействия на эргатический элемент сложной системы состоит из шести этапов [6–8].

На первом этапе определяются критерии Ri и варианты УЗ (ak), из которых впоследствии формируются базы (множество) критериев $\{Ri\}$ и УЗ $\{ak\}$.

Исходя из этого, 2-м этапом является оценка каждого критерия весом важности ($Ri/$) (все веса образуют единицу) и определение значений УЗ ($ak/$) по каждому критерию:

$$Ri/ \cong Ri * kв;$$

$$ak/ \cong ak * kз.$$

Далее (3-й этап) (проверка на согласованность) осуществляется выбор оптимальных вариантов УТЗ (ak^*) по каждому критерию, которые образуют базу оптимальных УЗ $\{ak^*\}$:

$$ak^* \cong ak / \max Ri/.$$

Под оптимальной понимается та УЗ, показатель которой имеет максимальное значение по одному из критериев, т.е. существует единственная УЗ, удовлетворяющая максимуму i -го критерия. Согласованное решение предусматривает, что по большинству критериев, используемых в ЗПР, выбрана одна и та же оптимальная УЗ.

Четвертым этапом является определение ситуации задачи принятия решений. Возможны три ситуации ПР: согласованное, несогласованное и конфликт. Сначала определяется, является ли ЗПР согласованной ($\exists! ak^* \in \max(Ri/)$), для каждой оптимальной УЗ существует единственный наиболее важный критерий, если да, то вариант УЗ, который чаще других имел наибольшее значение по критериям, и будет являться наилучшей УЗ для ЗПР. В случае если ЗПР не является согласованной, то необходимо проверить, существует ли в ней конфликт или нет ($\forall ak^* \exists! Ri$). Конфликт предусматривает, что каждая оптимальная УЗ может быть при нескольких критериях, причем в равном количестве. Несогласованное решение предусматривает, что каждая оптимальная УЗ может быть только при одном критерии.

В зависимости от ситуации на 5-м этапе осуществляется либо разрешение конфликта, либо устранение несогласованности. Каждая из этих операций выполняется поэтапно, количество которых зависит от сложности ситуации.

Заключительным этапом (6-й этап) является окончательное определение варианта УЗ.

Заключение

Разработка и внедрение подсистемы контроля и информационного воздействия на ЭЭ на основе искусственного интеллекта в состав эрготехнических систем обеспечат повышение уровня профессиональной подготовки специалистов по эксплуатации любых технических систем с присутствием эргатического элемента. В этом виден один из важнейших резервов повышения эффективности применения по назначению ЭТС, в частности, выполнение задач по предназначению, безопасности полетов и т.п.

Методология повышения качества ЭЭ в ЭТС на основе искусственного интеллекта позволяет реализовать математическое и программное обеспечение для подсистемы контроля и информационного воздействия на ЭЭ, которое интегрируется в любую программную среду.

Предлагаемая методология реализуется в виде модели ЭТС с интегрированной подсистемой контроля и информационного воздействия на эргатический элемент, которая позволит в автоматизированном режиме ориентироваться на каждого конкретного специалиста, определять и управлять программой его профессиональной деятельности и подготовки.

Научным решением задачи организации контроля действий и информационного воздействия на оператора является интегрирование в уже существующую структуру ЭТС специального режима контроля и информационного воздействия на ЭЭ, который реализуется в виде дополнительной подсистемы.

Поэтому именно повышение уровня профессиональной подготовки личного состава на основе применения программно-технических средств для автоматизации процесса освоения систем и их эффективного использования при решении задач по предназначению выходит на первый план ввиду достаточно быстрого развития сложных систем с участием человека.

Библиографический список

1. Тренажерные комплексы и тренажеры: технологии разработки и опыт эксплуатации / В. Е. Шукшунов, В. В. Циблиев, С. И. Потоцкий ; под ред. В. Е. Шукшунова. – М. : Машиностроение, 2005. – 384 с.
2. Интеллектуальные информационные системы и технологии / Ю. Ю. Громов, О. Г. Иванова, В. В. Алексеев, М. П. Беляев, Д. П. Швеиц, А. И. Елисеев. – Тамбов : Изд-во ТГТУ, 2013. – 244 с.
3. Алексеев, В. В. Моделирование информационного воздействия на эргатический элемент в эрготехнических системах / В. В. Алексеев, С. И. Корыстин, В. А. Малышев, В. В. Сысоев. – М. : Стенвил, 2003. – 163 с.
4. Алексеев, В. В. Анализ методов и моделей принятия решений для исследования слабоструктурированных систем / В. В. Алексеев, Е. В. Соловьева // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Сер.: Управление строительством. – 2015. – № 2 (7). – С. 151–154.

5. Антонова, Г. М. Моделирование процессов для поиска рационального решения / Г. М. Антонова // Информационные технологии. – 1999. – № 1. – С. 9–12.
6. Модели объекта изучения интеллектуальной компьютерной обучающей системы / В. А. Трусов, И. Д. Граб, В. Я. Баннов, А. В. Затылкин, Н. К. Юрков // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2009. – Т. 1. – С. 237–239.
7. Юрков, Н. К. Интеллектуальные компьютерные обучающие системы : монография / Н. К. Юрков. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2010. – 304 с.
8. Дивеев, А. И. Синтез управления движением мобильного робота по траектории методом интеллектуальной эволюции / А. И. Дивеев, Е. Ю. Шмалько, Н. К. Юрков // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2013. – Т. 1. – С. 188–190.

References

1. Shukshunov V. E., Tsibliyev V. V., Potocki S. I. *Trenazhernye komplekсы i trenazhery: tekhnologii razrabotki i opyt ehkspluatatsii* [Training complexes and simulators: development technologies and operating experience]. Moscow: Mashinostroenie, 2005, p. 384.
2. Gromov Yu. Yu., Ivanova O. G., Alekseev V. V., Belyaev M. P., Shvets D. P., Eliseev A. I. *Intellektual'nye informacionnye sistemy i tekhnologii* [Intellectual information systems and technologies]. Tambov: Izd-vo FGBOU VPO «TGTU», 2013, p. 244.
3. Alekseev V. V., Korystin S. I., Malyshev V. A., Sysoev V. V. *Modelirovanie informacionnogo vozdeystviya na ehrgaticheskij ehlement v ehrgotekhnicheskikh sistemah* [Simulation of information on the ergatic element in ergo-technical systems]. Moscow: Stensvil, 2003, p. 163.
4. Alekseev V. V., Solovyova E. V. *Nauchnyj vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: upravlenie stroitel'stvom* [Scientific Bulletin of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Series: construction management]. 2015, no. 2 (7), pp. 151–154.
5. Antonova G. M. *Informacionnye tekhnologii* [Information Technologies]. 1999, no. 1, pp. 9–12.
6. Trusov V. A., Grab I. D., Bannov V. Ya., Zatylnkin A. V., Yurkov N. K. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Works of the international symposium Reliability and quality]. 2009, vol. 1, pp. 237–239.
7. Yurkov N. K. *Intellektual'nye komp'yuternye obuchayushchie sistemy: monografiya* [Intellectual computer tutoring systems: monograph.]. Penza: Izd-vo Penz. gos. un-ta, 2010, p. 304.
8. Diveev A. I., Shmal'ko E. Yu., Yurkov N. K. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Works of the international symposium Reliability and quality]. 2013, vol. 1, pp. 188–190.

Алексеев Владимир Витальевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра информационных систем
и защиты информации,
Тамбовский государственный
технический университет
(392000, Россия, г. Тамбов, ул. Советская, 106)
E-mail: vvalex1961@mail.ru

Зайцев Александр Владимирович

доктор технических наук, профессор,
Военная академия Ракетных войск стратегического
назначения имени Петра Великого
(143900 Россия, г. Балашиха, ул. Карбышева, 8)
E-mail: ug253@mail.ru

Лысункин Павел Сергеевич

старший эксперт,
отдел Военно-научного комитета
Воздушно-космических сил
(119160, г. Москва, ул. Знаменка, 19)
E-mail: lysunkin@mail.ru

Alekseev Vladimir Vital'evich

doctor of technical sciences, professor,
department of information systems
and information security,
Tambov State Technical University
(392000, 106 Sovetskaya street, Tambov, Russia)

Zaitsev Aleksandr Vladimirovich

doctor of technical sciences, professor,
Military Academy of Strategic Rocket Forces
named after Peter the Great
(143900, 8 Karbysheva street, Balashikha, Russia)

Lysunkin Pavel Sergeevich

senior expert,
Department of Military-scientific
Committee of the aerospace defence forces
(119160, 19 Znamenka street, Moscow, Russia)

УДК 371.693.2

Алексеев, В. В.

Методология повышения качества эргатического элемента в эрготехнических системах на основе искусственного интеллекта / В. В. Алексеев, А. В. Зайцев, П. С. Лысункин // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 3 (23). – С. 17–22. – DOI 10.21685/2307-4205-2018-3-3.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ

TECHNOLOGICAL BASES OF IMPROVING THE RELIABILITY AND QUALITY OF PRODUCTS

УДК 656.13.072: 621.039

DOI 10.21685/2307-4205-2018-3-4

В. А. Острейковский, П. В. Антонюк, А. В. Антонюк

АНАЛИЗ РАБОТОСПОСОБНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ МОБИЛЬНЫХ БУРОВЫХ КОМПЛЕКСОВ ПО СТАТИСТИЧЕСКИМ ДАННЫМ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ В УСЛОВИЯХ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ¹

V. A. Ostreykovskiy, P. V. Antonyuk, A. V. Antonyuk

ANALYSIS OF THE PERFORMANCE AND RELIABILITY OF MOBILE DRILLING SYSTEMS BASED ON STATISTICAL DATA DURING OPERATION IN WESTERN SIBERIA

Аннотация. *Актуальность.* В практике основных нефтедобывающих компаний для поддержания рентабельности необходим ежегодный капитальный ремонт более чем трети и текущий ремонт более половины скважин. Собраны и обработаны статистические данные об отказах и простоях мобильных буровых комплексов в процессе выполнения технологических операций по текущему и капитальному ремонту нефтяных скважин на месторождениях Западной Сибири. Выявлены основные причины отказов МБК КВ-210 и важнейшие источники потери времени в простоях данных мобильных установок. Среди отказов элементов МБК наибольшее влияние на показатели безопасности оказывают поломки деталей мачты. В этом случае на подъем из скважины буровых колонн затрачивается продолжительное время. Основными причинами отказов мачт являются: затаскивание талевого блока под кронблок; перегрузка мачты; ослабление прочности конструкции мачты из-за коррозии; смещение кронблока по отношению к кронблочной балке, в результате чего нагрузка передается на одну сторону мачты и происходит излом мачты;

Abstract. In the practice of major oil companies, in order to maintain profitability, an annual overhaul of more than a third is needed and more than half of the wells are being serviced. The statistical data on the failures and idle times of mobile drilling complexes were collected and processed in the process of performing technological operations for the current and major repairs of oil wells in the fields of Western Siberia. The main causes of MBK KV-210 failures and the most important sources of time lost in the idle time of these mobile units have been identified. Among the failures of the IBC elements, the failure of the mast parts has the greatest impact on safety performance. In this case, a long time is expended from the drill string for lifting. The main reasons for the failure of the masts are: dragging the tackle block under the crown block; overloading mast; weakening the strength of the mast structure due to corrosion; displacement of the crown block in relation to the crown block, as a result of which the load is transferred to one side of the mast and the mast breaks; subsidence of foundations due to prolonged action of water and washing liquid; accidents due to failures of drill winches, power drives and other equipment; rup-

¹ Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 17-01-00244).

проседание фундаментов из-за длительного действия воды и промывочной жидкости; аварии из-за отказов буровых лебедок, силовых приводов и другого оборудования; разрыв рукавов высокого давления гидросистемы. Помимо отказов, оценена информация по простоям. Выявлены слабые места в системе обслуживания технического комплекса и причины большой продолжительности восстановления. *Методы.* Анализ статистических данных по наработкам оборудования проводился с помощью программного обеспечения STATISTICA 6.0. Работоспособность узлов и механизмов рассматривалась как отдельно по узлам и механизмам, так и по комплексам в целом. *Результаты и выводы.* Результаты статистической обработки приведенных данных об отказах мобильного комплекса и его элементов показывают, что качественное распределение отказов не противоречит закону распределения Вейбулла, что согласуется с результатами, полученными в более ранних публикациях. В ходе статистического анализа данных по отказам и простоям выявлены вид закона распределения и его параметры. Полученные результаты могут служить основой для совершенствования процедур обслуживания мобильных буровых комплексов и процесса рационального планирования поставки и расходования запасных частей, инструментов и принадлежностей.

Ключевые слова: надежность, мобильный буровой комплекс, эксплуатация.

ture of high pressure hoses of the hydraulic system. In addition to failures, information on downtime was assessed. Weaknesses in the maintenance system of the technical complex and the reasons for the long recovery period are revealed. The analysis of the statistical data on the operating time of the equipment was carried out with the help of STATISTICA 6.0 software. The efficiency of nodes and mechanisms was considered as separate for nodes and mechanisms, and for complexes in general. The results of statistical processing of the given data on the failures of the mobile complex and its elements show that the qualitative distribution of failures does not contradict the Weibull distribution law, which agrees with the results obtained in earlier publications. As a result of statistical analysis of data on failures and idle times, the form of the distribution law and its parameters were revealed. The results obtained can serve as a basis for improving the procedures for servicing mobile drilling complexes and the process of rational planning of the supply and consumption of spare parts, tools and supplies.

Key words: reliability, mobile drilling complex, operation.

Введение

В настоящее время в Ханты-Мансийском автономном округе Югры, где добывается более половины от всей нефти России, простаивает около 26 000 скважин. Ежегодно более 68 % нефтяных скважин требуют текущего и капитального ремонта, 26 % – профилактического осмотра. Только по ОАО «Сургутнефтегаз» для восстановления рентабельности ежегодно проводится капитальный ремонт более трети и текущий ремонт более половины скважин.

Современная техника, применяемая для ремонта нефтяных и газовых скважин, характеризуется значительным многообразием конструкций машин и агрегатов, обусловленным чрезвычайно широким диапазоном технологических функций, сочетающихся к тому же разнообразием типоразмеров и модификаций.

Кроме того, значительные отличия имеют условия эксплуатации: производственно-технологические особенности, воздействие факторов неблагоприятных условий внешней среды, высокий уровень и нестационарность действующих нагрузок и, как следствие, зачастую недостаточный уровень функциональной надежности, это связано со значительным объемом ремонтно-восстановительных работ, с частой заменой отработавших свой ресурс узлов и агрегатов. А это требует в свою очередь повышения технического уровня и надежности применяемого нефтепромыслового оборудования, повышения его технико-экономических и эксплуатационных показателей в климатических условиях Западной Сибири.

Одним из основных направлений является повышение эффективности и безопасности при поэтапном совершенствовании конструкций путем устранения основных их недостатков, приводящих к преждевременным отказам и значительным затратам времени на восстановление.

Применение мобильных буровых комплексов

При эксплуатации нефтяных скважин с целью устранения различных нарушений и отказов оборудования выполняется текущий или капитальный ремонт скважин [1, 2].

Для выполнения операций по текущему и капитальному ремонту скважин применяют мобильные буровые комплексы (далее МБК), состоящие из следующих основных групп оборудования:

1. оборудование для спускоподъемных операций. В состав этого комплекса входят силовые приводы, вспомогательные приводы подъема, трансмиссии, буровая лебедка, мачта, узлы талевого системы, гидродинамический тормоз, механизм (автомат) подачи долота, устройства для механизации спускоподъемных операций;

2. механизмы гидравлической системы, предназначенные для нагнетания под высоким давлением промывочной жидкости в зону работы ремонтного инструмента с целью очистки скважины от выбуренной породы. В этот комплекс входят: поршневые буровые насосы высокого давления, манифолды нагнетательной и всасывающей линии, вертлюг, оборудование для приготовления, приемки и очистки (регенерации) бурового раствора;

3. механизмы, обеспечивающие вращение буровой колонны, включающие ротор с приводом индивидуальным или от общего энергоблока и трансмиссии, также применяют систему верхнего привода включающую сам верхний привод с приводом индивидуальным или от общего энергоблока и трансмиссии;

4. оборудование и механизмы, предназначенные для выполнения дополнительных функций, не связанных непосредственно с технологическим процессом ремонта скважин, монтажно-транспортная база или сборно-разборные основания, грузоподъемные средства для механизации вспомогательных и ремонтных работ [3, 4].

Конструктивно-технологические особенности МБК определяются условиями текущего и капитального ремонта скважин.

Характерными неблагоприятными условиями эксплуатации МБК являются:

– специфичность технологических функций, связанная с текущим и капитальным ремонтом скважин, подъемом жидкости из скважин, обработкой призабойной зоны;

– удаленность от эксплуатационных и ремонтных баз, сложные условия транспортирования оборудования;

– высокий уровень воспринимаемых нагрузок и нестационарность режимов нагружения;

– абразивность и коррозионность среды;

– большие колебания температуры.

Специфической особенностью МБК является монтаж машин и агрегатов на месте проведения работ.

Характерные отказы МБК

Среди отказов элементов МБК наибольшую опасность представляют поломки деталей мачты. В этом случае на подъем из скважины буровых колонн затрачивается продолжительное время.

Основными причинами отказов мачт являются:

– затаскивание талевого блока под кронблок;

– перегрузка мачты;

– ослабление прочности конструкции мачты из-за коррозии;

– смещение кронблока по отношению к кронблочной балке, в результате чего нагрузка передается на одну сторону мачты и происходит излом мачты;

– проседание фундаментов из-за длительного действия воды и промывочной жидкости;

– аварии из-за отказов буровых лебедок, силовых приводов и другого оборудования;

– разрыв рукавов высокого давления гидросистемы.

Структурная схема надежности одного из самых массовых в ОАО «Сургутнефтегаз» МБК КВ-210 показана на рис. 1.

Статистические данные

Для сбора, обработки и хранения информации в ОАО «Сургутнефтегаз» используется информационная система SAP R/3.

Статистические данные по отказам узлов и механизмов 25 МБК КВ-210 за период эксплуатации с 2012 г. по 2017 г. на месторождениях Западной Сибири приведены на рис. 2.

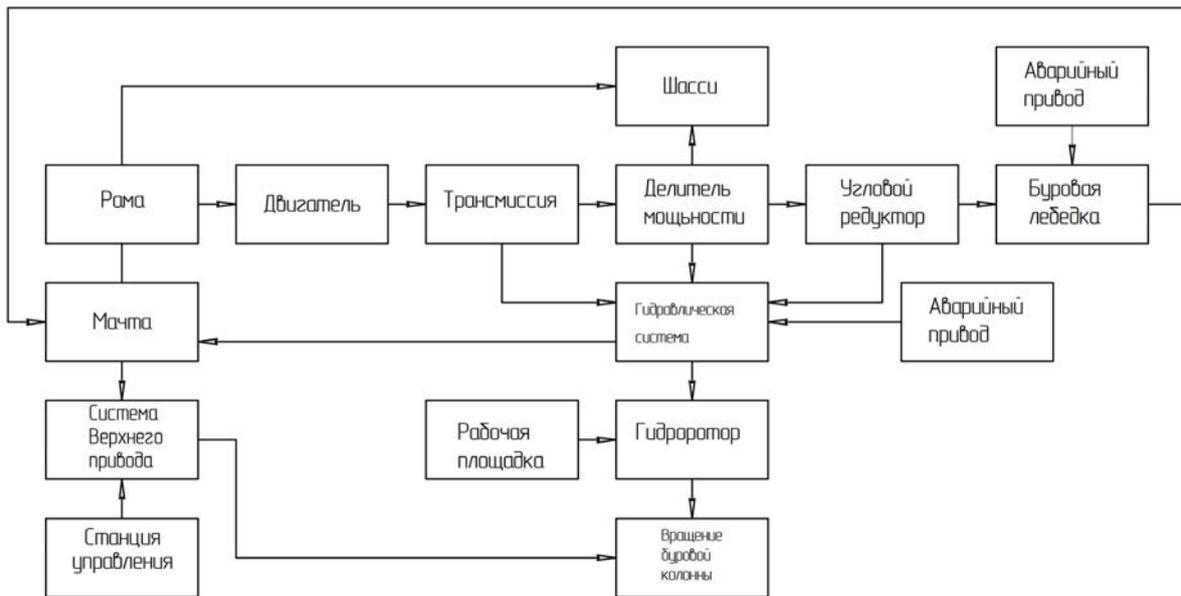


Рис. 1. Структурная схема надежности МБК KB-210

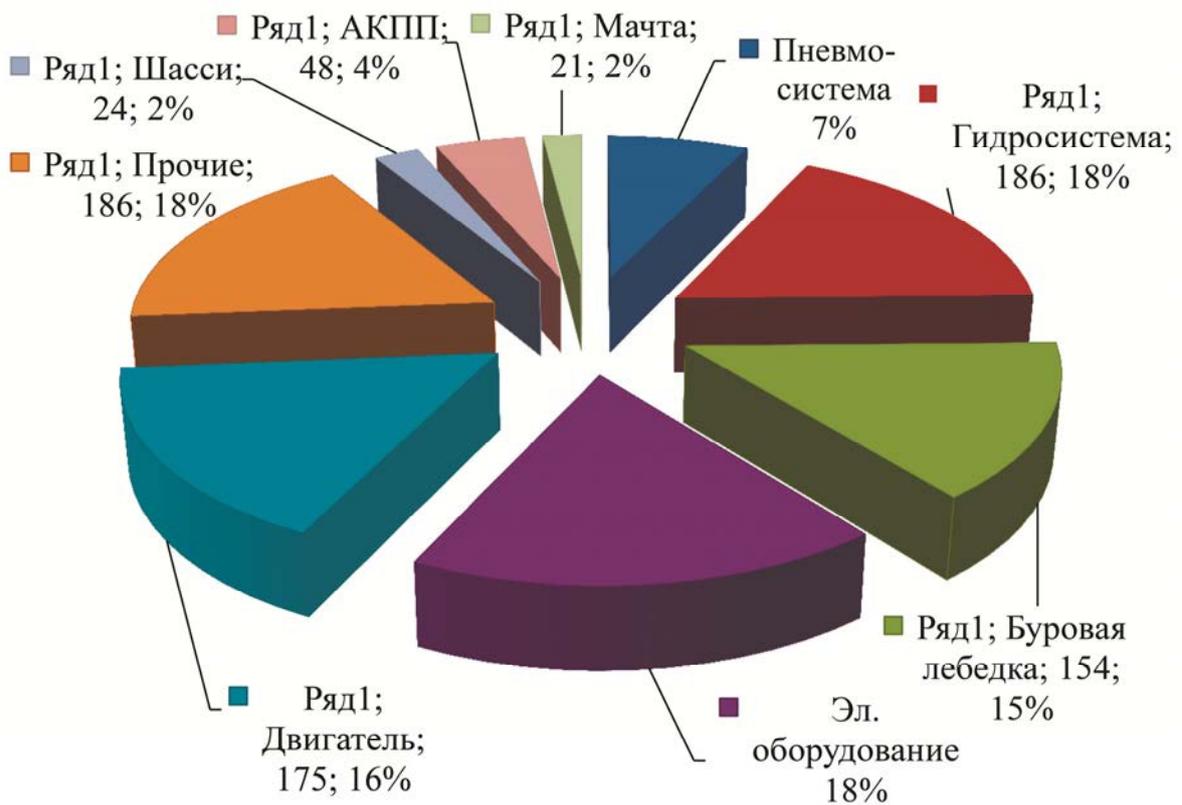


Рис. 2. Количество отказов подсистем МБК KB-210

Обработка статистических данных по отказам МБК KB-210 показала, что наименьшее количество отказов наблюдается в элементах шасси – около 2 % отказов. Такой процент отказов объясняется тем, что шасси эксплуатируется от 2 до 5 % от всего времени эксплуатации. Также наименьшее количество отказов наблюдается в элементах мачты, АКПП Allison и пневмосистемы.

Наибольшее количество отказов наблюдается в элементах двигателя «Detroit Diesel» серии 60 V8 около 16 %. Это объясняется тем, что он находится постоянно в работе в процессе эксплуатации, так как приводит в работу основные узлы и агрегаты. Также большое количество отказов наблюдается в элементах гидросистемы, пневмосистемы, буровой лебедки и электрооборудования.

Помимо отказов, накапливалась информация по простоям МБК КВ-210, представленная в табл. 1. Самое большое время тратится на восстановление элементов буровой лебедки около 910 ч в год, АКПП Allison – около 780 ч в год, двигателя «Detroit Diesel» серии 60 V8 – около 570 ч.

Таблица 1

Простои МБК КВ-210

Причина простоя	Время простоя 2014 г., ч	Время простоя 2015 г., ч	Время простоя 2016 г., ч
1. Буровая лебедка	926	908	897
2. АКПП Allison	798	566	975
3. «Detroit Diesel» серии 60 V8	636	548	534
4. Система верхнего привода	628	580	691
5. Гидравлическая система	368	304	355
6. Организационные причины МБК	558	202	136
7. Организационные причины системы верхнего привода	–	771	468
8. Электрооборудование	92	134	45
9. Прочие	176	127	184
10. Талевая система	81	104	24
11. Пневмосистема	103,5	73	69
12. Шасси	15	5	2
13. Суммарное время	4381,5	4322	4380

Большая продолжительность восстановления по данным причинам обусловлена сложным технологическим процессом замены неисправных деталей на МБК КВ-210 и территориальным положением МБК КВ-210 относительно ремонтных баз, средний пробег машин с ремонтными бригадами до МБК КВ-210 составляет около 300 км (при средней скорости 60 км/ч ремонтная бригада доберется только через 5 ч).

Своевременное определение причин отказов, наличие запасных частей, наличие транспорта, людей, погодные условия, состояние дорожного полотна – все эти факторы оказывают значительное влияние на время восстановления МБК КВ-210 в работоспособное состояние.

Анализ статистических данных

Анализ статистических данных по наработкам оборудования МБК КВ-210 проводился с помощью программного обеспечения STATISTICA 6.0. Работоспособность узлов и механизмов рассматривалась как отдельно по узлам и механизмам, так и по комплексам в целом.

В работах [5–10] было установлено, что наиболее часто распределение наработок на отказ сочетается с законом распределения Вейбулла. Этот закон [11] чаще всего используют для описания надежности и долговечности различных элементов сложных систем (рис. 3–6). Этот закон проявляется в модели так называемого «слабого звена». Так как МБК состоит из независимых друг от друга узлов и агрегатов, отказ каждого из которых приводит к отказу всего МБК, то в такой модели определяется распределение длительности достижения предельного состояния системы как распределение соответствующих наименьших значений отдельных узлов и агрегатов.

Результаты обработки информации о надежности МБК КВ-210 приведены в табл. 2. Из анализа полученных результатов можно сделать вывод, что наиболее надежным из сравниваемых комплексов является МБК КВ-210 (4403 ТА 86), средняя наработка на отказ которого составляет $36,5 \cdot 10^3$ ч. И наименее надежным из сравниваемых является МБК КВ-210 (7977 ТВ 86), средняя наработка на отказ составляет $21 \cdot 10^3$ ч.

Результаты обработки информации о надежности элементов МБК КВ-210 приведены в табл. 3. Из анализа полученных результатов можно сделать вывод, что наиболее надежным из сравниваемых элементов является гидравлический насос, средняя наработка на отказ которого составляет $13 \cdot 10^3$ ч, а наименее надежным – диафрагмы, средняя наработка на отказ составляет $7,9 \cdot 10^3$ ч. Низкая средняя наработка на отказ диафрагмы, по-видимому, объясняется тем, что она, во-первых, работает практически все время при выполнении работ по ремонту нефтяных скважин, а во-вторых, присутствует низкое качество составных деталей.

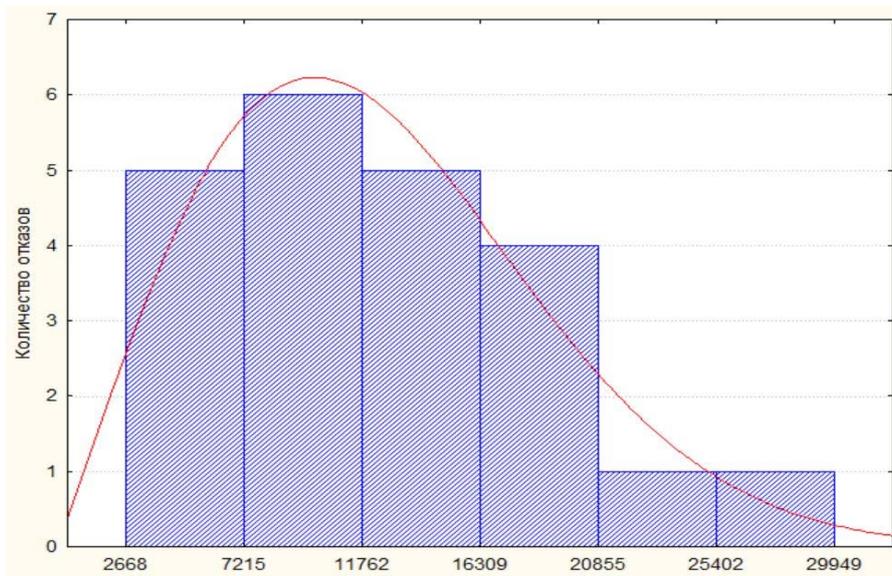


Рис. 3. Гистограмма наработок на отказ клапана Rexroth



Рис. 4. Гистограмма наработок на отказ гидравлического насоса

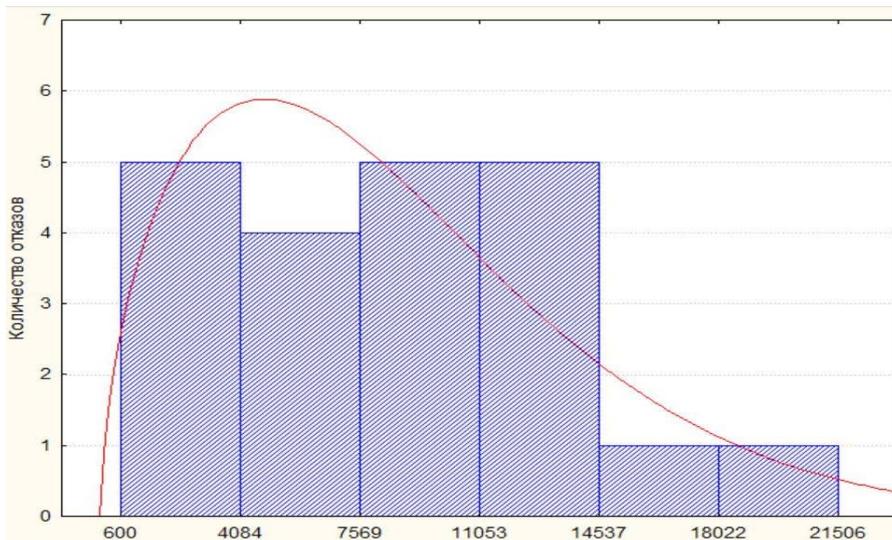


Рис. 5. Гистограмма наработок на отказ диафрагмы

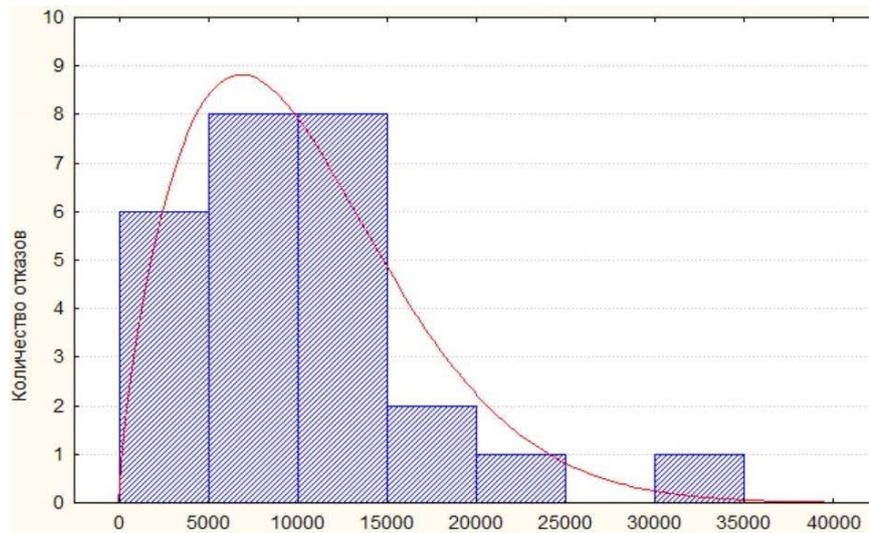


Рис. 6. Гистограмма наработок на отказ генератора 24V

Таблица 2

Результаты обработки информации о надежности мобильного бурового комплекса KB-210

Наименование	Год выпуска	Наработка 01.01.2018, ч	Количество отказов, n	Средняя наработка на отказ, ч. T_{cp}	Среднее квадр. откл., ч. σ_T	Коэффициент вариации	χ^2	$P(\chi^2)$
МБК KB-210 (4541 ТА 86)	2012	27527	324	14803	6965	0,46	11,52	0,33
МБК KB-210 (4403 ТА 86)	2012	36454	333	15277,7	8970,6	0,58	13,31	0,2
МБК KB-210 (4402 ТА 86)	2012	21056	82	9659,2	5299,6	0,55	7,19	0,53
МБК KB-210 (4537 ТА 86)	2012	23464	123	9691,6	5421,9	0,56	10,11	0,6
МБК KB-210 (4538 ТА 86)	2012	33850	168	14594,7	7829,8	0,54	12,75	0,42
МБК KB-210 (4564 ТА 86)	2012	34847	174	13947,3	8991,8	0,64	12,5	0,33
МБК KB-210 (4759 ТА 86)	2012	33717	136	13575	8213,3	0,6	13,05	0,25
МБК KB-210 (4761 ТА 86)	2012	34638	118	16466	8633,6	0,5	9,4	0,38
МБК KB-210 (7242 ТВ 86)	2014	22838	83	10190,7	4593	0,45	14,4	0,23
МБК KB-210 (7977 ТВ 86)	2014	21022	81	10978,3	5747	0,53	14,1	0,27

Таблица 3

Результаты обработки информации о надежности мобильного бурового комплекса KB-210

Наименование	Количество отказов, n	Средняя наработка на отказ, ч. T_{cp}	Среднее квадр. откл. ч. σ_T	Коэффициент вариации	χ^2	$P(\chi^2)$
Клапан REXROTH	22	12288	6507,6	0,6	1,99	0,6
Термостат 11.3704000	31	12578,5	8160,3	0,65	3,67	0,46
Диафрагма	21	7962,2	5922,6	0,74	0,95	0,61
Ремень SPZ-1060	22	8313,5	5502,4	0,66	5,13	0,68
Гидравлический насос	24	13076	8919,3	0,68	7,03	0,41
Генератор 24V	26	10192,3	6692,4	0,65	2,86	0,72
Пневмоклапан	31	930,8	354,3	0,37	0,83	0,66
Насос Челси	29	1300,6	469,3	0,34	1,02	0,58
Цепь роликовая	35	1023,4	943	0,33	0,76	0,7

Заключение

Общее количество отказов по 10 МБК КВ-210 за 2012–2014 гг. составляет 1622.

Основными причинами отказов являются [12, 13]:

- отказы элементов двигателя Detroit Diesel серии 60 V8–16 %;
- отказы элементов буровой лебедки – 15 %;
- отказы элементов гидросистемы – 18 %;
- отказы элементов электрооборудования – 18 %.

Наибольшее время затрачивается на ремонт элементов:

- буровой лебедки около 910 ч;
- АКПП Allison около 780 ч;
- двигателя Detroit Diesel» серии 60 V8 около 570 ч;
- гидравлической системы более 300 ч.

По сравнению с 2014 г. в 2016 г. наблюдается сокращение времени на восстановление элементов в работоспособное состояние, что говорит о повышении качества и надежности МБК КВ-210.

Приведенные данные об отказах МБК КВ-210 и его элементов позволяют предположить, что качественное распределение отказов не противоречит закону распределения Вейбулла [12, 14].

Библиографический список

1. Мобильная буровая установка 100 МТ «National Oilwell Varko». – USA, Pampa, Texas, 2014. – 2874 с.
2. ГОСТ 28113-89. Установки подъемные для освоения и ремонта нефтяных и газовых скважин. – М. : Стандартинформ, 2007. – 3 с.
3. ГОСТ Р 53683 (ИСО 13535:2000) Нефтяная и газовая промышленность. Буровое и эксплуатационное оборудование. Подъемное оборудование. Общие технические требования. – М. : Стандартинформ, 2011. – 38 с.
4. Вадецкий, Ю. В. Бурение нефтяных и газовых скважин / Ю. В. Вадецкий. – М. : Недра, 1985. – 185 с.
5. Чичеров, Л. Г. Расчет и конструирование нефтепромыслового оборудования : учеб. пособие для вузов / Л. Г. Чичеров, Г. В. Молчанов, А. М. Рабинович. – М. : Недра, 1987. – 422 с.
6. Кузнецов, А. С. Исследование надежности подъемных установок УП-40С / А. С. Кузнецов, М. М. Иванкив, С. Г. Щергин, К. А. Кузнецов // Нефтяное хозяйство. – 2010. – № 7. – С. 116–118.
7. Данилов, О. Ф. Надежность подъемных агрегатов А60/80 при капитальном ремонте скважин / О. Ф. Данилов, А. С. Кузнецов. – Тюмень, 2012. – 4 с.
8. Острейковский, В. А. Теория надежности : учеб. для вузов / В. А. Острейковский. – М. : Высш. шк., 2008. – 463 с.
9. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. – М. : Наука, 2003. – 576 с.
10. Надежность и эффективность в технике : справочник / ред. совет: В. С. Авдучевский, И. В. Аполлонов, Е. Ю. Барзилович. – М. : Машиностроение, 1989. – Т. 7. – 376 с.
11. ГОСТ Р 50779.27-2007 (МЭК 61649:1997) Статистические методы. Критерий согласия и доверительные интервалы для распределения Вейбулла. – М. : Стандартинформ, 2007. – 11 с.
12. Острейковский, В. А. Математические модели оценки техногенного риска сложных систем на основе распределения Эрланга / В. А. Острейковский, А. С. Павлов // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 1 (13). – С. 99–116.
13. Острейковский, В. А. Анализ моделей распределения характеристик техногенного риска по статистическим данным аварий и катастроф сложных критически важных объектов / В. А. Острейковский, Е. Н. Шевченко // Надежность и качество сложных систем. – 2015. – № 2 (10). – С. 3–12.
14. Острейковский, В. А. Анализ состояния обеспечения работоспособности компрессорных станций магистральных газопроводов на этапе эксплуатации / В. А. Острейковский, Н. А. Соловьев, Е. Н. Шевченко // Труды международного симпозиума Надежность и качество. – 2018. – Т. 1. – С. 61–64.

References

1. *Mobil'naya burovaya ustanovka 100 MT "National Oilwell Varko"* [Mobile drilling rig 100 MT "National Oilwell Varko"]. USA, Pampa, Texas, 2014, 2874 p.
2. *GOST 28113-89. Ustanovki pod'emnye dlya osvoeniya i remonta neftyanyh i gazovyh skvazhin* [Installation of lifting for the development and repair of oil and gas wells]. Moscow: Standartinform, 2007, 3 p.
3. *GOST R 53683 (ISO 13535: 2000) Neftyanaya i gazovaya promyshlennost'. Burovoe i ehkspluatacionnoe oborudovanie. Pod'emnoe oborudovanie. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya* [Oil and gas industry. Drilling and production equipment. Lifting equipment. General technical requirements]. 38 p.

4. Vadetsky Yu. V. *Burenie neftnyanyh i gazovyh skvazhin* [Drilling of oil and gas wells]. Moscow: Nedra, 1985, 185 p.
5. Chicherov L. G., Molchanov G. V., Rabinovich A. M. et al. *Raschet i konstruirovaniye neftepromyslovogo oborudovaniya: ucheb. posobie dlya vuzov* [Calculation and design of oilfield equipment: Proc. manual for universities]. Moscow: Nedra, 1987, 422 p.
6. Kuznetsov A. S., Ivankiv M. M., Schergin S. G., Kuznetsov K. A. *Neftyanoe hozyajstvo* [Oil industry]. 2010, № 7, pp. 116–118.
7. Danilov O. F., Kuznetsov A. S. *Nadezhnost' pod'emnykh agregatov A60/80 pri kapital'nom remonte skvazhin* [Reliability of lifting units A60 / 80 in the overhaul of wells]. Tyumen, 2012, 4 p.
8. Ostreykovsky V. A. *Teoriya nadezhnosti: ucheb. dlya vuzov* [Reliability Theory: Textbook. for universities]. Moscow: Vyssh. shkola, 2008, 463 p.
9. Wentzel E. S. *Teoriya veroyatnostej* [Probability Theory]. Moscow: Nauka, 2003, 576 p.
10. Avduevsky V. S., Apollonov I. V., Barzilovich E. Yu. *Nadezhnost' i ehffektivnost' v tekhnike: spravochnik* [Reliability and efficiency in technology: a Handbook]. Moscow: Mashinostroenie, 1989, vol. 7, 376 p.
11. *GOST R 50779.27-2007 (IEC 61649: 1997) Statisticheskie metody. Kriterij soglasiya i doveritel'nye intervaly dlya raspredeleniya Vejbul'a* [Statistical methods. The criterion of agreement and confidence intervals for the distribution of Weibull]. Moscow: Standartinform, 2007, 11 p.
12. Ostreykovsky V. A., Pavlov A. S. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem* [Reliability and quality of complex systems]. 2016, no. 1 (13), pp. 99–106.
13. Ostreykovsky V. A., Shevchenko E. N. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem* [Reliability and quality of complex systems]. 2015, no. 2 (10), pp. 3–12.
14. Ostreykovsky V. O., Soloviev N. A., Shevchenko E. N. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2018, vol. 1, pp. 61–64.

Острейковский Владислав Алексеевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра информатики и вычислительной техники,
Сургутский государственный университет
(628412, Россия, г. Сургут, ул. Ленина, 1)
E-mail: ostreykovsky_va@surgu.ru

Антонюк Павел Викторович

аспирант,
Сургутский государственный университет
(628412, Россия, г. Сургут, ул. Ленина, 1)
E-mail: pavel.100792@mail.ru

Антонюк Алена Викторовна

главный специалист,
ОАО «Сургутнефтегаз»
(628404, Россия, г. Сургут, ул. Энтузиастов, 50)
E-mail: antonyuk_alena@mail.ru

Ostreykovsky Vladislav Alekseevich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of informatics and computer science,
Surgut State University
(628412, 1 Lenin street, Surgut, Russia)

Antonyuk Pavel Viktorovich

postgraduate student,
Surgut State University
(628412, 1 Lenin street, Surgut, Russia)

Antonyuk Alena Viktorovna

chief specialist,
OJSC "Surgutneftegas"
(628404, 50 Entuziastov street, Surgut, Russia)

УДК 656.13.072: 621.039

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 (23). – С. 23–31. – DOI 10.21685/2307-4205-2018-3-4.

В. А. Острейковский, Н. А. Соловьев, Е. Н. Шевченко

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ КОМПРЕССОРНЫХ СТАНЦИЙ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ НА ЭТАПЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ¹

V. A. Ostreykovskiy, N. A. Solov'ev, E. N. Shevchenko

ANALYSIS OF THE STATUS OF PROVIDING OPERABILITY OF COMPRESSOR STATIONS OF THE GAS PIPELINE AT THE STAGE OF OPERATION

Аннотация. *Актуальность и цели.* Целью данной статьи является анализ состояния исследований и работ в области техногенного риска применительно к компрессорным станциям магистральных газопроводов. *Методы.* Приведена оценка правового и нормативно-технического обеспечения промышленной безопасности магистральных трубопроводов транспорта газа Российской Федерации, современного состояния аварийности на компрессорных станциях магистральных газопроводов РФ, США и Канады, основных принципов формирования системы мониторинга и прогнозирования возникновения аварийных ситуаций на компрессорных станциях магистральных газопроводов. *Результаты и выводы.* Приведены результаты анализа качества предоставляемой информации по произошедшим авариям и инцидентам в надзорные органы РФ, США и Канады, по которым необходимо проводить оценку техногенного риска на объектах компрессорных станций.

Ключевые слова: компрессорная станция, авария, риск аварии, механическое воздействие, брак строительства и изготовления, конструктивный недостаток, коррозия, износ оборудования.

Abstract. The purpose of this article is to analyze the status of research and publications in the field of technogenic risk in relation to compressor stations at gas pipelines. Conducted assessment of legal and normative-technical support of industrial safety of trunk pipeline transport of Russian gas, the current status of accidents at compressor stations of the Russian Federation, the United States and Canada, basic principles of formation of system of monitoring and forecasting of emergency situations at compressor stations. The analysis of the quality of information on past accidents and incidents to the Supervisory authorities of the Russian Federation, the USA and Canada, which is necessary to assess technogenic risks at the facilities of compressor stations.

Key words: compressor station, accident, risk of accident, mechanical impact, flaw of construction and production, constructive lack, corrosion depreciation of the equipment.

Введение

Широкое применение риск-ориентированного подхода базируется на использовании различных методик расчета риска реализации аварийных сценариев, как на линейной части, так и на объектах компрессорных станций (КС). Однако следует отметить, что методики расчета риска на КС проработаны значительно меньше, чем аналогичные методики на линейной части магистральных газопроводов (МГ). В частности, не определены факторы, влияющие на вероятность отказа того или иного технологического оборудования КС, не определены критерии изменения риска отказа технологического оборудования в зависимости от степени его изношенности, качества эксплуатации и других влияющих на надежность факторов эксплуатации.

Целью данной статьи является анализ состояния исследований и работ в области техногенного риска применительно к компрессорным станциям магистральных газопроводов.

¹ Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 17-01-00244).

Правовое и нормативно-техническое обеспечение промышленной безопасности магистрального трубопроводного транспорта газа Российской Федерации

В настоящее время в Российской Федерации сформирован необходимый комплекс законодательной, нормативной и научно-технической документации по обеспечению безопасности объектов системы магистральных газопроводов при возникновении чрезвычайных и аварийных ситуаций (рис.1).

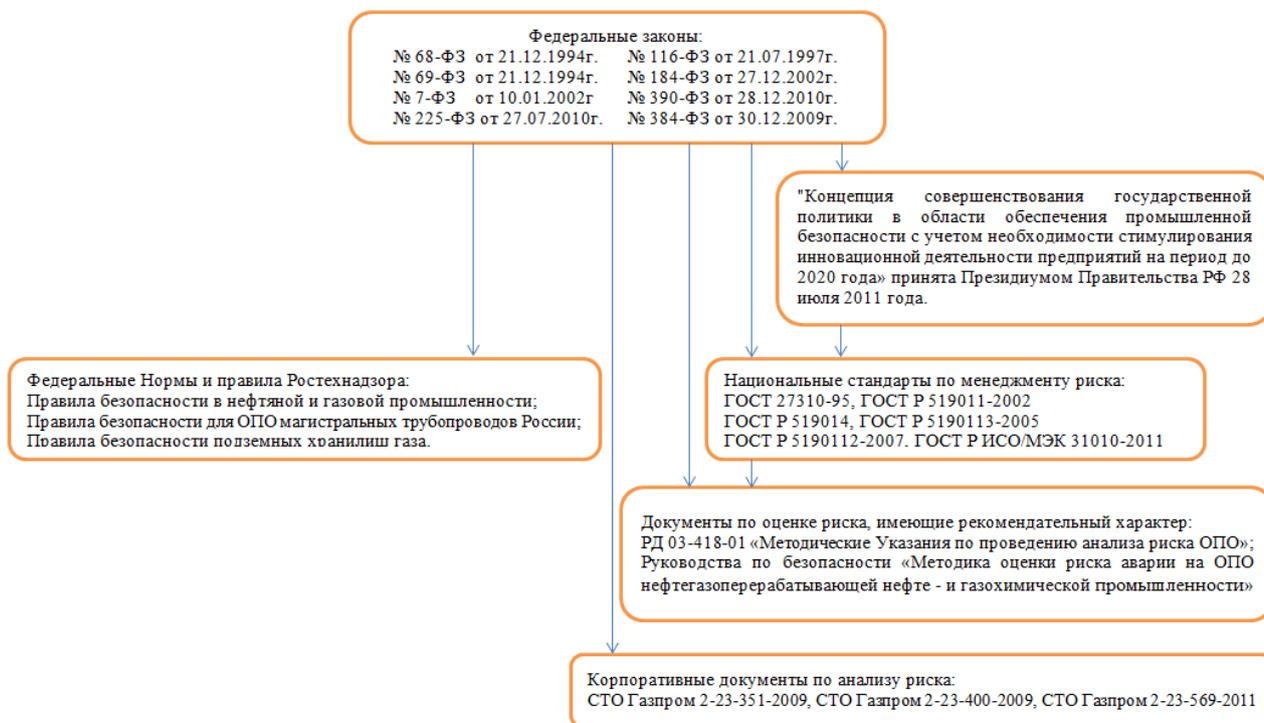


Рис. 1. Схема правового обеспечения промышленной безопасности МГ

Риск-ориентированный подход к обеспечению промышленной безопасности опасных производственных объектов базируется на анализе видов и последствий отказов, которые в свою очередь базируются на совокупности статистических и масштабности последствий аварии на объекте. Проведенный анализ широкого обсуждения применения риск-ориентированного подхода в научной сфере, например [1–4, 14–16], в том числе дискуссий о приемлемых критериях риска [5–8], показывает, что при внедрении указанного метода в управление промышленной безопасностью и техническое регулирование на объектах нефтегазового комплекса возникают значительные проблемы, решение которых зачастую невозможно в рамках существующей базы нормативной и нормативно-технической документации.

В рамках выполнения норм Закона РФ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» в ОАО «Газпром» разработаны следующие документы по анализу риска:

- СТО Газпром 2-2.3-351-2009. Методические указания по проведению анализа риска для опасных производственных объектов газотранспортных предприятий ОАО «Газпром»;
- СТО Газпром 2-2.3-400-2009. Методика анализа риска для опасных производственных объектов газодобывающих предприятий ОАО «Газпром»;
- СТО Газпром 2-2.3-569-2011. Методическое руководство по расчету и анализу рисков при эксплуатации объектов производства, хранения и морской транспортировки сжиженного и сжатого природного газа.

Величина риска – количественная мера безопасности. В основе оценки риска лежит определение вероятности возникновения нежелательного события и его последствий.

Современное состояние аварийности на КС Российской Федерации, США и Канаде

Аварийные ситуации на компрессорных станциях магистральных газопроводов, кроме экономического ущерба от простоя, потерь газа и немалых затрат на ликвидацию аварий, создают значи-

тельную угрозу для окружающей среды. Анализ статистики аварийности и причин, вызывающих аварии на площадочных сооружениях магистральных газопроводов, является важнейшим этапом формирования системы обеспечения безопасности таких объектов.

Для выявления тенденций в аварийности на площадочных сооружениях, в том числе с требованиями по обеспечению промышленной безопасности, была проанализирована информация доступных баз данных аварий и чрезвычайных ситуаций на площадочных сооружениях магистральных газопроводов Российской Федерации, Канады и США [9–13].

В указанных государствах сбор данных по аварийности на объектах трубопроводного транспорта осуществляется на государственном уровне в соответствии с национальным законодательством: в США – Бюро трубопроводной безопасности Управления по безопасности трубопроводов и опасным материалам (Office of Pipeline Safety under the Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration – OPS PHMSA (www.phmsa.dot.gov) Министерства транспорта, в Канаде – Департамент безопасности на транспорте Канады (Transportation Safety Board of Canada (www.tsb.gc.ca), в России – Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор (www.gosnadzor.ru)).

Для сопоставления данных по количеству аварий необходимо оценить различия в определении понятия «авария» и какие события к ней относятся:

Канада:

- все утечки газа независимо от объема;
- утечки нефти и нефтепродуктов не менее 1,5 м³;
- эксплуатация трубопровода с нарушением предельных проектных параметров, установленных законодательством;

США:

- наличие выброса высокоопасной жидкости свыше 5 баррелей (0,8 м³) или других жидкостей свыше 50 баррелей (8 м³);
- оцененный ущерб превышает 50 000 долл. США;
- наличие смертельно травмированных людей или получение травм требующих госпитализации;
- выброс вещества сопровождающийся взрывом или пожаром;

Российская Федерация:

- объем утечки более 10 м³ жидкости / более 10 000 м³ газа;
- смертельное травмирование / травмирование с потерей трудоспособности;
- воспламенение опасной жидкости или взрыв ее паров / взрыв или воспламенение газа;
- повреждение или разрушение других объектов;
- загрязнение водных объектов.

В Канаде транспортом природного газа занимаются 66 компаний, объем транспорта в 2013 г. составил 163 млрд кубических метров природного газа, общая длина газопроводов – 55 972 км.

Магистральные газопроводы Канады характеризуются высоким уровнем безопасности и низкой удельной аварийностью. По данным работы [11], удельная аварийность на магистральных газопроводах Канады составляет 0,11 аварий в год на 1000 км, для сравнения, удельная аварийность на магистральных газопроводах в России составляет 0,13, удельная аварийность в США – 0,14, Европы – 0,14.

Система трубопроводного транспорта природного газа в США является крупнейшей в мире, общая длина транспортных газопроводов без учета коллекторных и распределительных сетей составила на 2013 г. 298 233 мили (около 480 тыс. км), общее число операторов газопроводов составляет около 1100 компаний.

В Российской Федерации находятся в эксплуатации более 280 КС МГ, около 800 КЦ, порядка 4000 ГПА.

Ввиду нехватки открытой отечественной статистики возникает потребность в использовании «внешних» зарубежных источников статистической информации. Однако без установления и обоснования критериев подобия оценка аварийности на основе зарубежных данных представляется недостоверной.

Статистика аварий и инцидентов на КС Канады, США, РФ представлена в табл. 1.

Таблица 1

Аварии на КС магистральных газопроводах Канады, США, РФ

Год	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Аварии на КС Канада	1	0	4	2	2	3	5	0	3	4	2	0	0	0
Аварии (инциденты) на КС США	8	13	11	6	10	17	14	27	29	29	35	44	45	38
Аварии на КС РФ	–	–	–	–	–	1	1	1	0	0	1	0	1	1

В условиях статистического «голода» для определения вероятности аварий могут быть применены подходы, описанные в работах [14–16].

Рассматривая аварии на компрессорных станциях в нашей стране, основными факторами возникновения аварий на КС МГ являются следующие:

– наличие большого числа арматуры, тройников, переходников, фасонных частей, мест с усложненной технологией изготовления и проведения СМР, ухудшенного контроля качества сварных швов, с повышенной концентрацией напряжений;

– наличие значительного числа переходов трубопроводов из подземного положения в надземное, являющихся местами повышенной коррозионной активности и концентрации напряжений;

– сложная пространственная прокладка надземных трубопроводов обвязки (ТПО) компрессорных агрегатов с большим числом жестких и скользящих опор, сочетающаяся со значительными переменными температурными и газодинамическими (вибрационными) нагрузками со стороны нагнетателя.

Основные причины, приведшие к авариям на КС РФ за период 2009–2017 гг. [13], приведены в табл. 3.

Таблица 3

Причины аварий на компрессорных станциях РФ за период 2009–17 г.

Год аварии (инцидента)	Кол-во аварий	Тип события	Место аварии (инцидента)	Причина	Сопутствующие причины
2009	1	Инцидент (крупная утечка)	ТПО ГПА Ду720*11,3	Недопустимые дефекты по кольцевому сварному соединению	Просадка ТПО
2010	1	Авария	Выходной шлейф Д1420*18,7	КРН	В месте расположения отводов
2011	1	Авария	Межцеховая перемычка Д1020*15,2	Недопустимые дефекты по кольцевому сварному соединению	
2014	1	Авария	Узел подключения, Д1420	Применение электродов с низким классом прочности. Охрупчивание металла кольцевого сварного соединения	Допустимые дефекты, повышенный уровень НДС
2016	1	Авария	Узел подключения, Д530	Механическое повреждение (задир) металла стенки трубы	
2017	1	Авария	Узел подключения, трубопровод импульсного газа Д159*6	Заводские дефекты трубы (риски, утонение стенки)	

По опыту эксплуатации объектов КС одного из газотранспортного общества в Западной Сибири наиболее нагруженными элементами ТПО КЦ являются угловые сварные соединения, по которым преимущественно и происходят инциденты (отказы) с разгерметизацией газопроводов [17].

Указанные инциденты по разным причинам не фиксируются на государственном уровне в РФ, что является ограничением при оценке риска по статистическим данным [18].

По результатам обследований делается вывод, что причинами отказов явились:

- брак, допущенный при строительном-монтажных работах (недопустимые катеты, перегрев тонкой стенки патрубка, подрезы и наплывы);
- остаточные сварочные напряжения (не устраненные из-за отсутствия термообработки при СМР, тройниковых соединений, работающих в условиях вибрации);
- внешние нагрузки, такие как вибрация и появление дополнительных механических напряжений по причине температурной деформации и заземления, механические характеристики металла сварного шва;
- снижение характеристик трещиностойкости по причине достижения отрицательных температур в момент дросселирования газа.

Основные принципы формирования системы мониторинга и прогнозирования возникновения аварийных ситуаций на КС МГ

Одним из недостатков существующего на данный момент нормативно-технического обеспечения безопасности КС МГ является подход, при котором обеспечение безопасности трубопроводного транспорта рассматривается преимущественно на стадии эксплуатации. В соответствии с данным подходом считается, что безопасность опасного производственного объекта на стадии эксплуатации обеспечена, если соблюдаются все требования нормативно-технических документов и требований.

Несмотря на большое количество нормативной и регламентирующей документации, которая определяет порядок расчетов и проектирования компрессорных станций магистральных газопроводов, вопрос построения модели взаимодействия проекта компрессорной станции с окружающей средой в различных климатических условиях, в том числе сложных, а также при различных социально-экономических условиях требует детальной проработки.

Выводы и рекомендации

Анализ законодательной и нормативной базы, которая используется при проектировании, строительстве и эксплуатации КС магистральных газопроводов, по проблемам промышленной безопасности и чрезвычайным ситуациям показывает:

1. Несмотря на наличие нормативных документов в области обеспечения промышленной безопасности и охраны окружающей среды, складывается убеждение, что недостаточно определены основы построения системы управления деятельностью трубопроводных компаний по предупреждению чрезвычайных ситуаций в процессе реализации проектов.
2. Проект компрессорной станции магистрального газопровода целесообразно рассматривать как сложную организационно-техническую систему, которая включает в себя этапы проектирования, строительства и эксплуатации всех видов ресурсов (временных, трудовых, финансовых и материально-технических), а также процесс принятия и исполнения управленческих решений. Такая система имеет в наличии также ряд ограничений и правил взаимодействия ее элементов, которые включают в себя продолжительность, интенсивность, последовательность, совмещение, надежность и безопасность для повышения показателей эффективности.
3. Основой в системе предупреждения аварийных и чрезвычайных ситуаций является разработка мероприятий по обеспечению безопасной реализации проекта и минимизации влияния негативных последствий наступления опасных событий.
4. Для всестороннего исследования проблемы прогнозирования возникновения аварийных ситуаций на КС МГ необходимо разработать такие модели и алгоритмы возникновения и развития аварийной ситуации на оборудовании КС, которые с достаточной степенью точности будут описывать явления, происходящие в системе обеспечения безопасности и безаварийной эксплуатации оборудования КС.
5. Для решения практических задач необходимо разработать такие методики, которые, будучи направлены на прогнозирование аварийных ситуаций, обеспечат снижение риска АС для всего жизненного цикла КС МГ.

6. В целом существующая система нормативной и правовой документации рассматривает риск-ориентированный подход как основной в обеспечении промышленной безопасности КС МГ, тенденции развития будут направлены на углубление применения риск-ориентированных методов и постепенный отказ от директивно установленных норм и правил ПБ.

7. Анализируя статистику аварий на компрессорных станциях магистральных газопроводов США, РФ и Канады, следует отметить, что аварии и инциденты на компрессорных станциях и прочих площадочных сооружениях являются довольно характерными для систем транспорта природного газа РФ, Канады и США и являются постоянными источниками техногенного риска.

Таким образом, на КС наиболее подвержены авариям сварные соединения трубопроводов обвязки КС.

Библиографический список

1. Ревазов, А. М. Пути минимизации риска при разработке и реализации инвестиционных проектов строительства магистральных трубопроводов / А. М. Ревазов // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 1997. – № 6. – С. 118.
2. Лисанов, М. В. О техническом регулировании и критериях приемлемого риска / М. В. Лисанов // Безопасность труда в промышленности. – 2004. – № 5. – С. 11–14.
3. Гражданкин, А. И. К риск-ориентированной промбезопасности / А. И. Гражданкин // Контроль качества продукции. – 2012. – № 7. – С. 18–23.
4. Лисанов, М. В. О регулировании промышленной безопасности по количественным критериям допустимого риска / М. В. Лисанов, Е. В. Ханин, С. И. Сумской // Безопасность труда в промышленности. – 2012. – № 12. – С. 54–62.
5. Елохин, А. Н. Проблема выбора критериев приемлемого риска / А. Н. Елохин, А. А. Елохин // Проблемы анализа риска. – 2004. – Т. 1, № 2. – С. 138–145.
6. Трбоевич, В. М. Критерии риска в странах ЕС / В. М. Трбоевич // Проблемы анализа риска. – 2004. – Т. 1, № 2. – С. 106–115.
7. Гражданкин, А. И. Критерии приемлемого риска / А. И. Гражданкин // Безопасность труда в промышленности. – 2007. – № 6. – С. 69.
8. Лисанов, М. В. О критериях приемлемого риска аварий на опасных производственных объектах химического и нефтегазового комплекса / М. В. Лисанов, С. Н. Буйновский // Безопасность труда в промышленности. – 2009. – № 3. – С. 76–78.
9. Леонович, И. А. Анализ аварийности на компрессорных станциях магистральных газопроводов / И. А. Леонович, А. М. Ревазов // Труды Российского государственного университета нефти и газа им. И. М. Губкина. – 2014. – № 2 (275). – С. 26–33.
10. Лисанов, М. В. Анализ российских и зарубежных данных по аварийности на объектах трубопроводного транспорта / М. В. Лисанов, А. В. Савина, Е. А. Самусева, Д. В. Дегтярев // Безопасность труда в промышленности. – 2010. – № 7. – С. 16–22.
11. Pipeline occurrence data from January 2004 [Transportation Safety Board of Canada]. – URL: <http://tsb.gc.ca/eng/stats/pipeline/index-ff.asp> (дата обращения 30.11.2017).
12. PHMSA incident report [US DOT Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration]. – URL: <https://hip.phmsa.dot.gov/analyticsSOAP/saw.dll?Portalpages> (дата обращения 30.11.2017).
13. Годовые отчеты о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору [Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору]. – URL: www.gosnadzor.ru/public/annual_reports/ (дата обращения 29.11.2017).
14. Острейковский, В. А. Теория техногенного риска: математические методы и модели : монография / В. А. Острейковский. – Сургут : ИЦ СурГУ, 2013. – 320 с.
15. Острейковский, В. А. Математические модели оценки техногенного риска сложных систем на основе распределения Эрланга / В. А. Острейковский, А. С. Павлов // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 1. – С. 99–116. – URL: <http://nikas.pnzgu.ru/nikss14116>
16. Острейковский, В. А. Анализ моделей распределения характеристик техногенного риска по статистическим данным аварий и катастроф сложных критически важных объектов / В. А. Острейковский, Е. Н. Шевченко // Надежность и качество сложных систем. – 2015. – № 2 (10). – С. 3–12.
17. Соловьев, Н. А. О промышленной безопасности компрессорной станции транспорта газа / Н. А. Соловьев, С. Я. Аронов, В. А. Острейковский // Север России: Стратегии и перспектива развития : материалы III Всерос. науч.-практ. конф. (г. Сургут, 26 мая 2017 г.) : в 3 т. – Сургут : ИЦ СурГУ, 2017. – Т. II. – С. 94–99.
18. Острейковский В. А. Анализ состояния обеспечения работоспособности компрессорных станций магистральных газопроводов на этапе эксплуатации / В. А. Острейковский, Н. А. Соловьев, Е. Н. Шевченко // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2018. – Т. 1. – С. 61–64.

References

1. Revazov A. M. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Neft' i gaz* [News of higher educational institutions. Oil and gas]. 1997, no. 6, p. 118.
2. Lisanov M. V. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti* [Labor safety in industry]. 2004, no. 5, pp. 11–14.
3. Grazhdankin A. I. *Kontrol' kachestva produktsii* [Product quality control]. 2012, no. 7, pp. 18–23.
4. Lisanov M. V., Khanin E. V., Sumskey S. I. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti* [Occupational safety in industry]. 2012, no. 12, pp. 54–62.
5. Elokhin A. N., Elokhin A. A. *Problemy analiza riska* [Problems of risk analysis]. 2004, vol. 1, no. 2, pp. 138–145.
6. Trbojevich V. M. *Problemy analiza riska* [Problems of risk analysis]. 2004, vol. 1, no. 2, pp. 106–115.
7. Grazhdankin A. I. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti* [Labor safety in industry]. 2007, no. 6, p. 69.
8. Lisanov M. V., Buynovskiy S. N. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti* [Labor Safety in Industry]. 2009, no. 3, pp. 76–78.
9. Leonovich I. A., Revazov A. M. *Trudy Rossijskogo gosudarstvennogo universiteta nefti i gaza im. I. M. Gubkina* [Works of the Russian State University of Oil and Gas named I. M. Gubkin]. 2014, no. 2 (275), pp. 26–33.
10. Lisanov M. V., Savina A. V., Samuseva E. A., Degtyarev D. V. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti* [Occupational safety in industry]. 2010, № 7, pp. 16–22.
11. *Pipeline occurrence data from January 2004* [Transportation Safety Board of Canada]. Available at: <http://tsb.gc.ca/eng/stats/pipeline/index-ff.asp> (accessed Nov. 30, 2017).
12. *PHMSA incident report* [US DOT Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration]. Available at: <https://hip.phmsa.dot.gov/analyticsSOAP/saw.dll?Portalpages> (accessed Nov. 30, 2017).
13. *Annual reports on the activities of the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision* [Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision]. Available at: www.gosnadzor.ru/public/annual_reports/ (accessed Nov. 29, 2017).
14. Ostreykovsky V. A. *Teoriya tekhnogenogo riska: matematicheskie metody i modeli: monografiya* [The Theory of Technogenic Risk: Mathematical Methods and Models: monograph]. Surgut: IC SurGU, 2013, 320 p.
15. Ostreykovsky V. A., Pavlov A. S. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem* [Reliability and Quality of Complex Systems]. 2016, no. 1, pp. 99–116. Available at: <http://nikas.pnzgu.ru/nikss14116>
16. Ostreykovsky V. O., Shevchenko E. N. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem* [Reliability and quality of complex systems]. 2015, no. 2 (10), pp. 3–12.
17. Soloviev N. A., Aronov S. Ya., Ostreykovsky V. A. *Sever Rossii: Strategii i perspektiva razvitiya : materialy III Vseros. nauch.-prakt. konf. (g. Surgut, 26 maya 2017 g.): v 3 t.* [North of Russia: Strategies and Development Perspective: materials of the III All-Russian Scientific and Practical Conference (Surgut, May 26, 2017): in 3 tons]. Surgut : ITs SurGU, 2017, vol. II, pp. 94–99.
18. Ostreykovsky V. O., Soloviev N. A., Shevchenko E. N. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2018, vol. 1, pp. 61–64.

Острейковский Владислав Алексеевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра информатики и вычислительной техники,
Сургутский государственный университет
(628412, Россия, г. Сургут, ул. Ленина, 1)
E-mail: ostreykovsky_va@surgu.ru

Соловьев Николай Александрович

аспирант,
Сургутский государственный университет
(628412, Россия, г. Сургут, ул. Ленина, 1)
E-mail: solonick1@yandex.ru

Шевченко Елена Николаевна

кандидат физико-математических наук, доцент,
кафедра информатики и вычислительной техники,
Сургутский государственный университет
(628412, Россия, г. Сургут, проспект Ленина, 1)
E-mail: elenan_27@mail.ru

Ostreykovsky Vladislav Alekseevich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of informatics and computer science,
Surgut State University
(628412, 1 Lenin street, Surgut, Russia)

Soloviev Nikolay Alexandrovich

postgraduate student,
Surgut State University
(628412, 1 Lenin street, Surgut, Russia)

Shevchenko Elena Nikolaevna

candidate of physical and mathematical sciences,
associate professor,
sub-department of informatics and computer science,
Surgut State University
(628412, 1 Lenin street, Surgut, Russia)

УДК 621.039+622.692

Острейковский, В. А.

Анализ состояния обеспечения работоспособности компрессорных станций магистральных газопроводов на этапе эксплуатации / В. А. Острейковский, Н. А. Соловьев, Е. Н. Шевченко // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 3 (23). – С. 32–39. – DOI 10.21685/2307-4205-2018-3-5.

В. П. Перевертов, М. Н. Пиганов, Н. К. Юрков

МЕТОДИКА РАСЧЕТА БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕГО ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА КУЗНЕЧНО-ШТАМПОВОЧНОЙ МАШИНЫ С СИСТЕМОЙ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

V. P. Perevertov, M. N. Piganov, N. K. Yurkov

CALCULATION METHODOLOGY OF FAST ACTING ACTUATOR FORGING-AND-STAMPING MACHINE SYSTEM, DIAGNOSTIC CONTROL

Аннотация. *Актуальность и цели.* Муфтовые винтовые прессы (МВП) представляют собой новый тип кузнечно-штамповых машин (КШМ), предназначенных для технологических операций точной горячей и холодной объемной и листовой штамповки и т.д., для привода которых используется кинетическая энергия постоянно вращающегося в одном направлении маховика. Для совершения рабочего хода деформирования маховик соединяется с винтом и по окончании его отсоединяется от винта соединительной муфтой (исполнительный орган), быстродействие которой является важной технологической и эксплуатационной характеристикой качества управления МВП. В работе изложена методика расчета быстродействующего исполнительного органа МВП с системой диагностического управления, предназначенная для повышения надежности технологического оборудования в гибких производственных системах (ГПС) и получения качественной продукции (деталей) ракетно-космической техники и скоростного железнодорожного транспорта из титановых, композитных и наноматериалов и сплавов. *Материалы и методы.* Дана методика проекторочного расчета быстродействующего исполнительного органа МВП в условиях ГПС с системой диагностического управления, составными частями которой является методика расчета динамики срабатывания гидроприводной муфты МВП с импульсным сбрасывающим клапаном (ИСК), позволяющая рассчитывать динамические параметры муфты, и методика синтеза математического обеспечения процессов управления. Представлена взаимозависимость элементов структурно-функциональной и математических моделей системы «КШМ – инструмент – заготовка – диагностическое управление – исполнительный орган КШМ», влияющих на качество и надежность элементов КШМ. *Результаты.* Полученные алгоритм расчета динамики срабатывания гидроприводной муфты МВП с ИСК и методика синтеза математического обеспечения алгоритмов адаптивного управления МВП позволяют получить системы контроля и диагностики параметров технологического процесса и

Abstract. *Background.* Coupling screw presses (MVP) are a new type of forge-and-stamping machines (KShM), designed for precision hot and cold volume and sheet stamping operations, etc., for the drive of which the kinetic energy of a constantly rotating direction of the flywheel. To accomplish the working stroke of the deformation, the flywheel is connected to the screw and, at the end, it is disconnected from the screw by a joint clutch (executive body) whose speed is an important technological and operational characteristic of the quality management of the profit center. In the paper, the methodology for calculating the fast-acting executive body of the Profit Center with a diagnostic control system designed to increase the reliability of technological equipment in flexible production systems (GPS) and to obtain high-quality products (parts) of rocket and space equipment and high-speed railway transport from titanium composites and nanomaterials and alloys. *Materials and methods.* The method of design calculation of the high-speed executive body of the MVP under the conditions of GPS with a diagnostic control system is provided. Its components are the procedure for calculating the dynamics of the operation of a hydro-driven coupling MVP with a pulse drop-off valve (ICS), which allows calculating the dynamic parameters of the coupling and the procedure for synthesizing the software of processes management. The interdependence of the elements of the structural-functional and mathematical models of the system "KShM – tool – blank – diagnostic control – the executive body of the KShM", affecting the quality and reliability of the elements of the KShM, is presented. *Results.* The obtained algorithm for calculating the dynamics of the operation of the hydraulic clutch of the MVP with the ICS and the methodology for synthesizing the mathematical support of the adaptive control algorithms of the MVP enable us to obtain control and diagnostic systems for the parameters of the technological process and the equipment of the boring machine-building plant. *Conclusions.* It is shown that without the control and diagnostics of product quality indicators, using modern methods and measuring instruments, including laser, infrared, fiber optic sensors and

оборудования КШМ заготовительного производства. *Выводы.* Показано, что без контроля и диагностики показателей качества продукции с помощью современных методов и средств измерения, включая лазерные, инфракрасные, волоконно-оптические датчики и устройства, невозможно обеспечить высокое качество при изготовлении и ремонте, а также безопасность и экологичность работы технологической системы.

Ключевые слова: система, контроль, качество, надежность, математическое обеспечение, технологическое оборудование, винтовой пресс.

devices, it is impossible to provide high quality in manufacturing and repair, as well as the safety and environmental friendliness of the technological system.

Key words: system, control, quality, reliability, software, technological equipment, screw press.

Введение

Качество – комплексное понятие, характеризующее эффективность всех сторон деятельности: разработка стратегии и тактики, организация и управление производством, маркетинг и менеджмент. Определенный набор свойств продукции, удовлетворяющий потребности заказчика, называют потребительским качеством продукции (изделия). Успех любого бизнеса в производстве определяется качеством, а также сроками изготовления и ценой. Метрология, стандартизация и сертификация (МСС) – это инструменты обеспечения качества продукции и услуг. Анализируя триаду, можно сделать следующие выводы: 1) метрология методами различного контроля гарантирует, что изготовленная продукция соответствует стандарту, техническим условиям чертежей, документации; 2) стандарт устанавливает основные потребительские свойства товара в соответствии с требованиями к системам обеспечения качества (стандарты ИСО серии 9000); 3) сертификация – это процедура, посредством которой независимая третья сторона документально удостоверяет, что продукция (услуга) соответствует требованиям всех нормативных документов.

Муфтовые винтовые прессы (МВП) представляют собой новый и перспективный класс кузнечно-штамповых машин (КШМ), предназначенных для технологических операций горячей и холодной объемной штамповки в закрытых и открытых штампах,ковки, листовой штамповки, чеканки, калибровки и т.д. в качестве базового оборудования в условиях применения гибких производственных систем (ГПС). В отличие от винтовых прессов (ВП) традиционных конструкций [1] в МВП для привода рабочих частей используется кинетическая энергия постоянно вращающегося в одном направлении маховика. Для совершения рабочего хода деформирования маховик соединяется с винтом и по окончании его отсоединяется от винта соединительной муфтой (исполнительный элемент). Поэтому быстрое действие отключения муфты (должно быть на порядок меньше времени совершения хода деформирования), осуществляемое системой управления, является важной технологической и эксплуатационной характеристикой качества управления МВП.

В работе предложена методика проекторного расчета быстродействующего исполнительного органа МВП с системой диагностического управления, составными частями которой являются: взаимозависимость математических моделей системы «КШМ – инструмент – заготовка – диагностическое управление – исполнительный орган КШМ» (рис. 1); методика расчета динамики срабатывания гидроприводной муфты МВП с импульсным сбрасывающим клапаном (ИСК), являющимся исполнительным органом системы управления; методика синтеза математического обеспечения алгоритмов адаптивного управления МВП. Она позволяет рассчитывать на ЭВМ динамические параметры муфты и синтезировать математическое обеспечение ВП управления.

Математические модели системы «КШМ – инструмент – заготовка – диагностическое управление – исполнительный орган КШМ»

В разработанной системе (рис. 1) важным элементом является система диагностического управления, составными частями которой являются системы контроля, диагностики и управления [2].

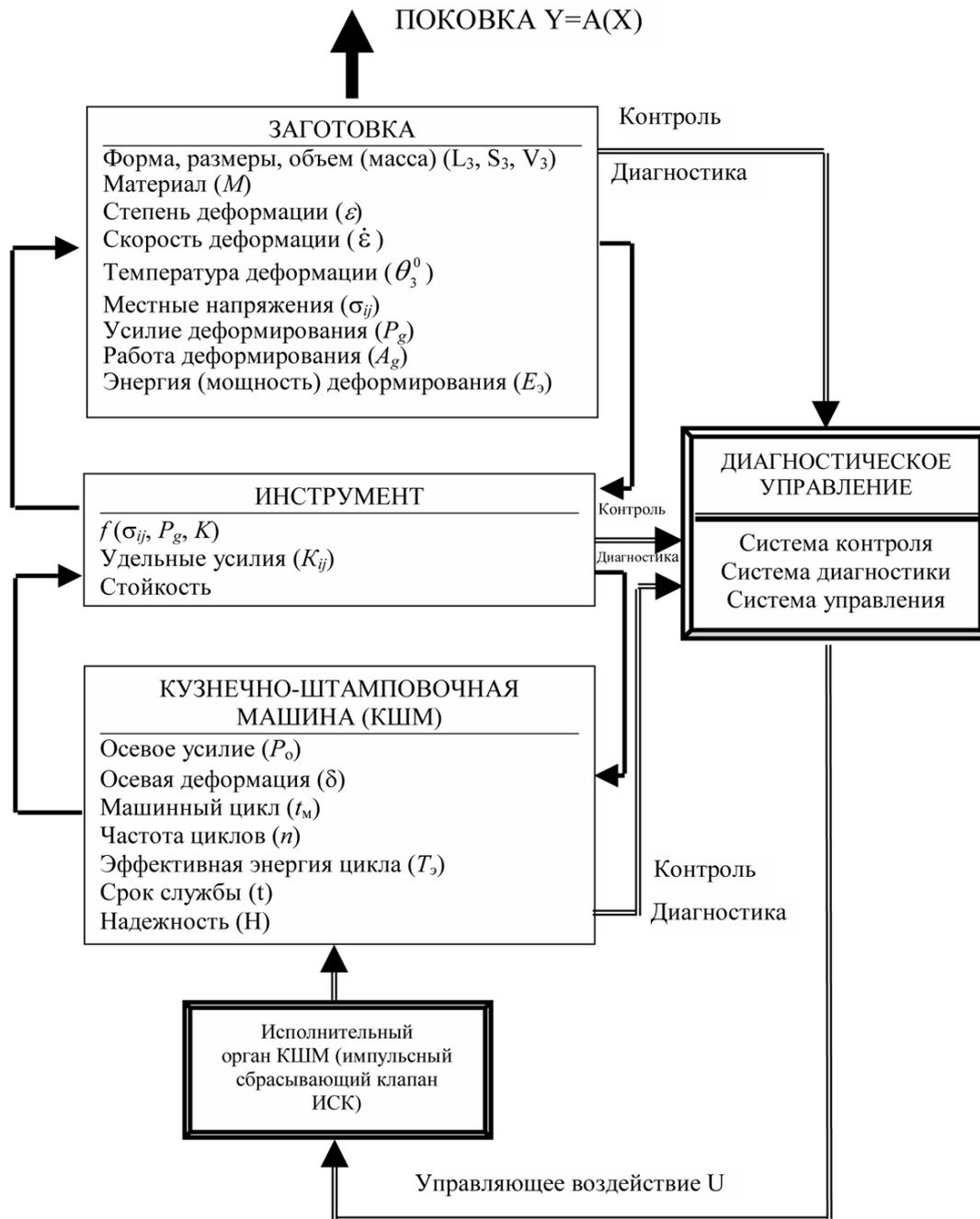


Рис. 1. Взаимозависимость математических моделей системы «КШМ – инструмент – заготовка – диагностическое управление – исполнительный орган КШМ»

Для организации обслуживания, наладки и эксплуатации КШМ в ГПС необходимо постоянно оценивать с помощью средств контроля и диагностики техническое состояние отдельных элементов оборудования и технологического процесса. На дискретный характер работы КШМ оказывают влияние внешние и внутренние факторы. Своевременная информация о техническом состоянии отдельных элементов конструкции КШМ позволит повысить их надежность и долговечность, безопасность, а также осуществлять быструю переналадку и обслуживание в ГПС [3].

Диагностика позволяет обнаружить отказы, дефекты и неисправности и своевременно устранить их в процессе работы и обслуживания ГПС или отключить неисправный и включить резервный канал и обеспечить непрерывное функционирование системы. При диагностировании КШМ в составе ГПС необходимо установить место, способ и средства контроля. При этом выбираются параметры, контроль которых дает наиболее объективную информацию о техническом состоянии машины [4].

Наиболее простыми являются случаи, когда показания датчика выходного параметра КШМ непосредственно характеризуют техническое состояние машины и можно не учитывать влияние посторонних факторов.

Если при этом известна функциональная связь между выходными параметрами состояний и характеристиками состояний (отказов), то можно составить контрольную картотеку изменения параметров для различных первичных неисправностей и диагностировать состояние КШМ или ее элементов.

При адаптивном управлении процессом деформирования на ГПМ необходим контроль параметров заготовки, инструмента, системы управления, привода и рабочих узлов кузнечной машины в исходном состоянии, в процессе деформирования и в конечном состоянии.

К контролируемым параметрам заготовки относятся температура, масса (объем), химический состав, геометрические размеры, наличие микротрещин. Своевременная информация о состоянии заготовки дает возможность вычислять и корректировать в условиях ГПС энергетические и кинематические параметры кузнечной машины, необходимые для получения поковок (штамповок) с размерами в пределах поля допуска при минимальной перегрузке механической системы и привода. При организации непрерывного контроля за состоянием заготовки в процессе деформирования, в особенности для горячей объемной штамповки иковки на КШМ, необходимы датчики, обеспечивающие безотказную и надежную работу в условиях повышенного уровня вибрации, температур, запыленности и загазованности окружающей среды. В наибольшей степени этим требованиям удовлетворяют цифровые бесконтактные датчики [5].

Диагностирование состояния инструмента (температура, деформация, износ) позволяет предупредить поломку инструмента и выход размеров заготовки за пределы поля допуска. По температуре инструмента можно судить о стабильности процесса деформирования и макроструктуре поковок и предупредить возможную потерю устойчивости системы (норма, риск, отказ) [6].

Контроль энергетических и кинематических параметров подвижных частей КШМ дает возможность определить запасенную энергию и усилие деформирования. Диагностирование состояния механической системы КШМ (например, измерение напряжений в станине прессы) может предупредить перегрузку и поломку базовых деталей, а также позволяет косвенно судить о состоянии деформируемой заготовки. Контроль параметров КШМ ударного действия, связан с трудностями обеспечения надежной и безотказной работы датчиков на различных этапах машинного цикла, продолжительность которого составляет несколько долей секунды, а ускорение может достигать 1000g, что затрудняет установку на ней средств контроля и диагностики.

Управление КШМ должно осуществляться только после определения технического состояния рассмотренных элементов системы [1].

Методика расчета динамики срабатывания гидроприводной муфты МВП с ИСК

Проведенные экспериментальные исследования (компьютерное и схемотехническое моделирование; натурные испытания) позволили разработать алгоритм методики расчета динамики срабатывания гидроприводной муфты с ИСК, состоящий из 11 этапов.

1. Анализ конструкции ВП, муфты и гидросистемы и разработка общей динамической модели [7].

На данном этапе производятся следующие действия:

1.1. анализ конструктивной схемы; обоснование допущений и выбор расчетной схемы;

1.2. разбиение схемы на отдельные элементы;

1.3. представление отдельных элементов в виде их механических эквивалентов с сосредоточенными параметрами;

1.4. анализ взаимодействия отдельных элементов и представление взаимодействий механическими эквивалентами;

1.5. синтез фрагментов динамической модели по отдельным сложным узлам и агрегатам конструктивной схемы;

1.6. синтез общей динамической модели по фрагментам.

Результатом этапа является общая многомассовая и многомоментная сосредоточенная динамическая модель гидроприводной муфты МВП.

2. Разработка эквивалентной схемотехнической модели.

Результатом этапа является электротехническая схема, эквивалентная динамической модели, в которой напряжения представляют давления рабочей жидкости, токи – расходы рабочей жидкости, индуктивности – приведенные массы, емкости – упругости, сопротивления – скоростные механические и гидравлические сопротивления, источники напряжения – источник давления, источники тока – источники расхода рабочей жидкости [8].

3. Разработка математической модели.

На данном этапе на основе динамической модели формулируется система дифференциальных уравнений с начальными и граничными условиями, описывающих динамику срабатывания муфты, импульсного клапана, входного и выходного распределителя, динамику давлений и расходов в элементах гидросистемы, динамику разгона и торможения винта с ползуном [9].

4. Предварительный анализ динамики срабатывания, включающий следующие этапы:

- 4.1. формирование таблицы конструктивных параметров ВП, муфты и гидроарматуры;
- 4.2. вычисление приведенных масс и жесткостей элементов;
- 4.3. определение частот собственных колебаний элементов и объединение их в группы по общему порядку частот собственных колебаний;
- 4.4. вычисление чисел Рейнольдса для гидравлических элементов по ориентировочному времени протекания гидравлических процессов;
- 4.5. определение гидравлического режима и вычисление коэффициентов гидравлического сопротивления;
- 4.6. разбиение модели на фрагменты с общим порядком частот собственных колебаний и общим гидравлическим режимом.

Результатом данного этапа является определение совокупности исходных данных для численного расчета, существенно нелинейных элементов модели и фрагментов модели, подлежащих отдельному численному расчету.

5. Численный расчет по нелинейной математической модели.

Результатом данного этапа является программа численного расчета динамики нелинейных фрагментов и получение численных результатов расчетов.

6. Численный расчет по линейной (линеаризованной) модели с применением средств программного комплекса ПА-6.

7. Проведение проверочных расчетов по упрощенным математическим моделям фрагментов.

8. Анализ и сопоставление полученных результатов расчетов по линейной и упрощенной моделям.

9. Корректировка моделей и программ расчета по выявленным существенным неточностям и ошибкам.

10. Повторное проведение расчетов.

11. Выработка рекомендаций по оптимизации проектируемой конструкции МВП, гидроприводной муфты, гидроарматуры. На данном этапе можно проводить оптимизирование параметров гидросистемы привода муфты, например, длин и диаметров гидролиний, масс и эффективных площадей поршней, затворов, золотников [10].

Критериями оптимизации могут служить быстрдействие напорного и сливного распределителей, время отключения муфты, энергетические потери маховика на проскальзывание в муфте, скорость поршня муфты при ее включении. Алгоритм методики расчета динамики срабатывания гидроприводной муфты МВП с ИСК приведен на рис. 2.

Методика синтеза математического обеспечения алгоритмов адаптивного управления МВП

Управление МВП может осуществляться по одному из трех способов: по ходу деформирования S_d , по усилию деформирования P_d , по работе деформирования A_d .

Задача программного управления МВП заключается в отключении муфты при достижении одним из параметров S_d , P_d , A_d заданного значения [11].

При управлении по заданному усилию деформирования (P_d) путем регулирования давления в полости муфты, величину давления в полости муфты P , соответствующую заданному усилию деформирования, можно определять по соотношению

$$P = \frac{P_{д1} D_{c1} \operatorname{tg}(\alpha + \operatorname{arctg} \mu_1)}{\mu_2 D_{c2} F n}, \quad (1)$$

где D_{c1} , D_{c2} – средние диаметры винта и фрикционного кольца; μ_1 , μ_2 – коэффициент трения в винтовой паре и в муфте; α – угол подъема резьбы винта; F – площадь поршня муфты; n – число пар трения муфты.

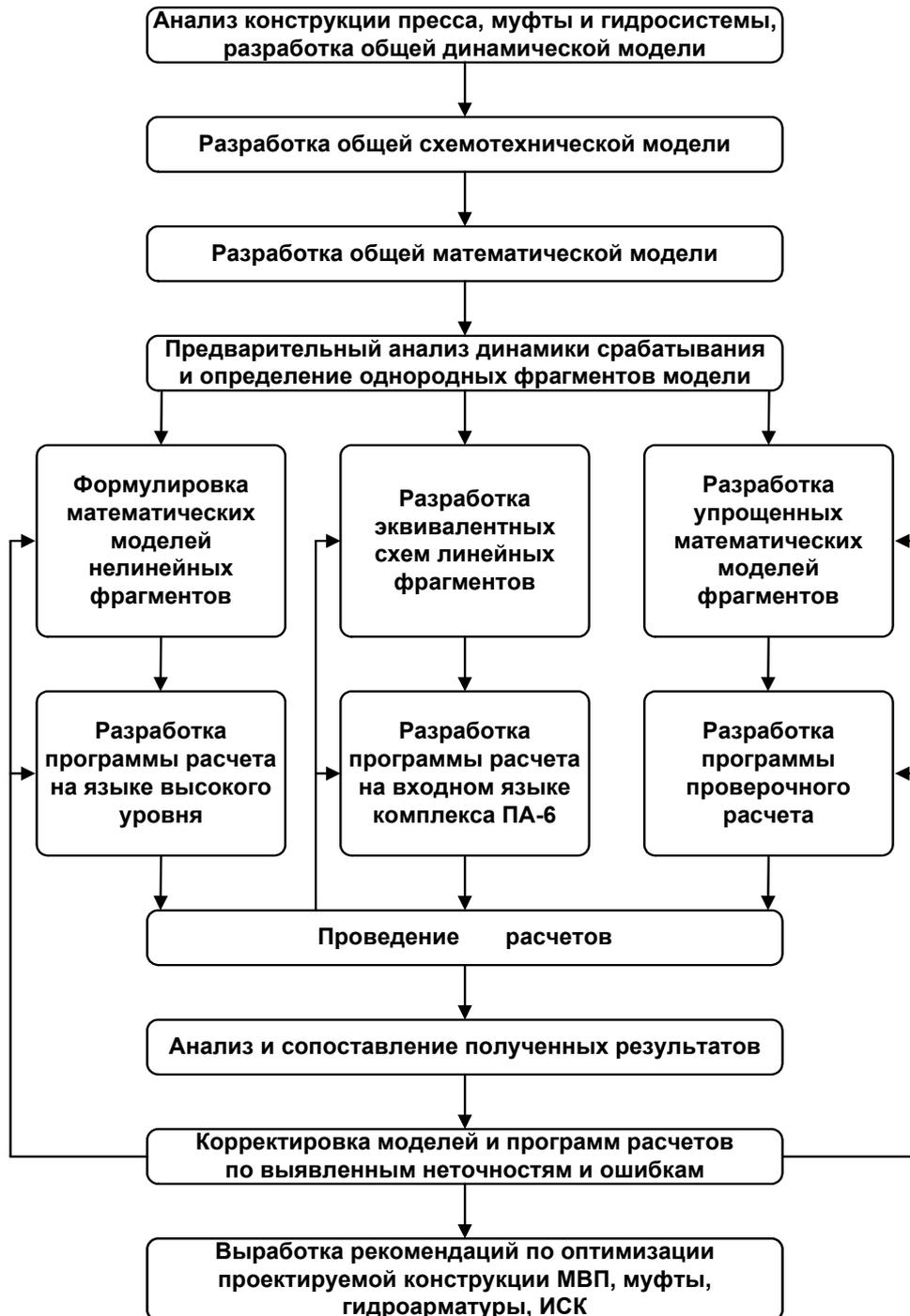


Рис. 2. Алгоритм расчета динамики срабатывания гидроприводной муфты МВП с ИСК

При управлении по величине совершенной работы деформирования A_d с контролем угловой скорости ω маховика, величину угловой скорости, соответствующую заданной работе деформирования, можно определять из соотношения

$$\omega_1 = \left[\frac{2A_{д1}}{\eta_d \left(J_m + J_v + \frac{mh^2}{4\pi^2} \right) - \omega_n^2} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

где J_m , J_v – моменты инерции маховика и винта; m – масса ползуна с гайкой и верхним штампом; h – ход резьбы винта; ω_n – номинальная скорость маховика.

Алгоритмы адаптивного управления ВП могут использоваться при управлении как по величине усилия, так и по величине работы деформирования.

Идея адаптивного управления ВП заключается в использовании информации о результатах штамповки, получаемой по обратной связи, для корректировки и уточнения оптимальных величин P_d или A_d в режиме реального технологического процесса. Адаптивное управление позволяет в ходе технологического процесса автоматически уточнять неизвестную или неточно определенную ранее зависимости максимального усилия деформирования или потребной работы деформирования от контролируемых технологических переменных: температуры θ_3 , объема V_3 , химического состава заготовки H_3 и т.д. При этом автоматически учитываются и компенсируются изменения неконтролируемых параметров, например, объема и формы полостей штампов за счет износа [12].

Для осуществления адаптивного управления необходима организация обратных связей по результатам хода деформирования. В соответствии с работой [13] для определения отклонений усилия или работы деформирования от их оптимальных значений на отдельном машинном цикле достаточно одновременно осуществлять контроль величины перемещения ползуна и усилия деформирования на рабочем ходе. По получаемой информации об отклонениях P_d и A_d от оптимальных значений P_d^0 и A_d^0 восстанавливаются линейные многомерные регрессии P_d^0 и A_d^0 на значения контролируемых входных переменных. В этом и заключается сущность математического обеспечения адаптивного управления МВП.

Согласно исследованиям [1], общий алгоритм синтеза математического обеспечения адаптивного управления МВП можно сформулировать в следующем виде:

1) выбор способа адаптивного управления. На данном этапе в зависимости от типа технологической операции, используемых датчиков контроля и исполнительных органов системы управления, вида обратной связи, выбирается один из двух способов управления: по максимальной величине усилия деформирования P_d или по величине потребной работы деформирования A_d ;

2) выбор целевых условия адаптивного управления. На данном этапе принимается решение о целесообразности использования условия гарантированного избежания недоштаповки;

3) выбор уровня надежности избежания недоштаповки;

4) выбор модификации адаптивного регулятора. На данном этапе в соответствии с априорными данными о совокупности контролируемых и неконтролируемых технологических параметров, степени влияния неконтролируемых параметров, мощности процессора системы управления выбирается одна из модификаций адаптивного регулятора в соответствии с рекомендациями, изложенными в работе [13];

5) синтез исходной модели технологического процесса. На данном этапе должны быть выработаны зависимости усилия деформирования или работы деформирования от контролируемых технологических параметров на основании аналитических или экспериментальных исследований;

6) формулировка алгоритма математических операций, реализующих адаптивный регулятор, в соответствии с результатами, полученными в работе [14];

7) разработка программы для процессора системы управления, реализующей алгоритм управления с вычислительными операциями.

Алгоритм методики синтеза математического обеспечения адаптивного управления МВП приведен на рис. 3.

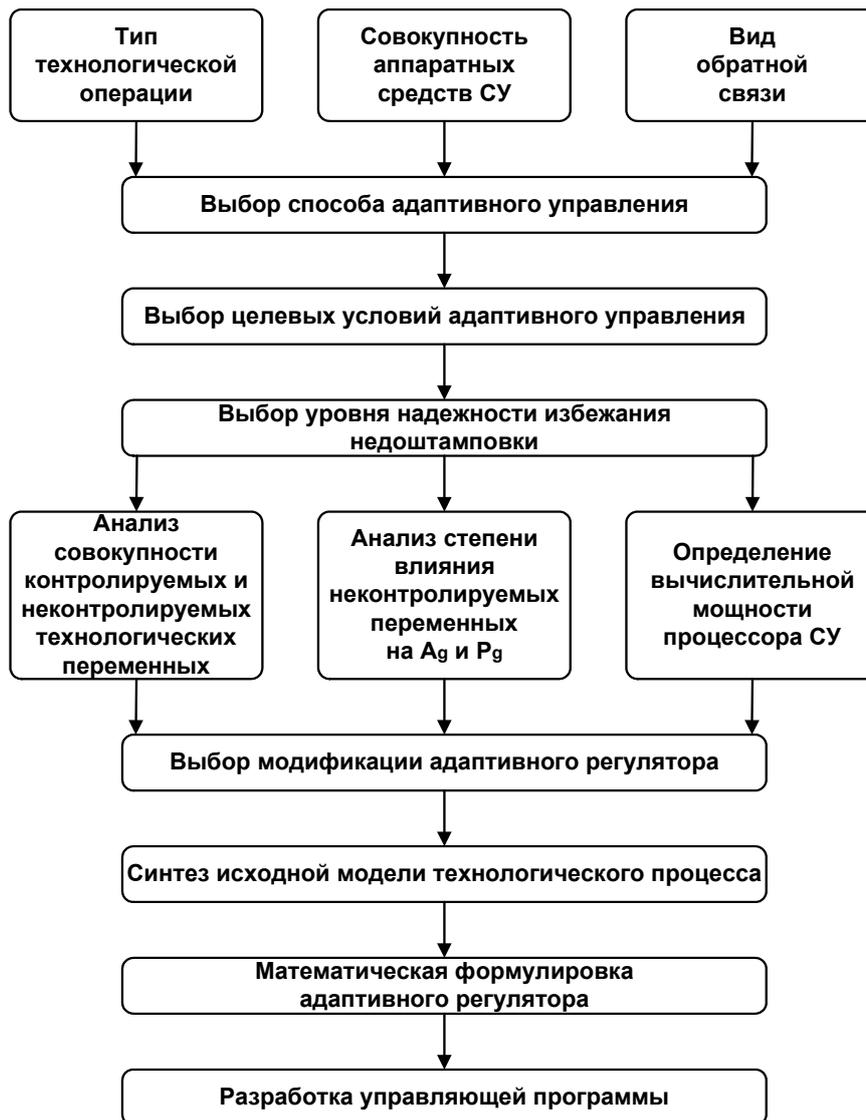


Рис. 3. Алгоритм методики синтеза математического обеспечения адаптивного управления МВП

Таким образом, на основе разработанного алгоритма удастся создать систему адаптивного управления МВП, пользуясь получаемым математическим обеспечением [15].

Заключение

1. В работе изложена методика проекторочного расчета быстродействующего исполнительного органа муфтового винтового пресса (МВП) с системой диагностического управления, предназначенная для разработки и совершенствования надежности технологического оборудования в гибких производственных системах (ГПС) и получения качественной продукции (деталей) ракетно-космической техники и скоростного железнодорожного транспорта из титановых, композитных и наноматериалов и сплавов.

2. Структура требований к системе диагностирования должна включать обеспечение: методическое, лингвистическое, математическое, программное, техническое, эргономическое, а технология производства должна включать системы активного контроля и диагностики параметров технологического процесса и оборудования, включая контроль физических (геометрических, химических, температурных) параметров и т.д. Без контроля показателей качества продукции с помощью современных методов и средств измерения, включая лазерные, инфракрасные, волоконно-оптические датчики и устройства, невозможно обеспечить высокое качество и надежность их изготовления и ремонта, безопасность и экологичность работы.

Библиографический список

1. *Перевертов, В. П.* Управление кузнечными машинами в ГПС / В. П. Перевертов, Ю. А. Бочаров, М. Е. Маркушин. – Куйбышев : Куйбышевское кн. изд-во, 1987. – 160 с.
2. *Перевертов, В. П.* Метрология. Стандартизация. Сертификация : конспект лекций / В. П. Перевертов. – 3-е изд., перераб. и доп. – Самара : СамГУПС, 2017. – 212 с.
3. А.с. № 1834436 (СССР). Клапан сбрасывающий импульсный / В. П. Перевертов, Ю. А. Бочаров, М. Е. Маркушин и др. // *Изобретения*. – 1992. – № 39. – С. 23.
4. *Перевертов, В. П.* Повышение качества поковок при горячей объемной штамповке на КШМ ударного действия в ГПС / В. П. Перевертов // *Труды Международного симпозиума Надежность и качество*. – 2006. – С. 155–158.
5. *Чертыковцева, Н. В.* Программно-аппаратный комплекс оптимизации режимов работы системы охлаждения дизеля тепловоза / Н. В. Чертыковцева, А. В. Иванов, В. П. Перевертов // *Труды Международного симпозиума Надежность и качество*. – 2014. – Т. 1. – С. 408–411.
6. *Перевертов В. П.* Классификация отказов ГПМ обработки материалов давлением / В. П. Перевертов, И. К. Андрончев, М. М. Абулкасимов // *Труды Международного симпозиума Надежность и качество*. – 2016. – Т. 2. – С. 143–147.
7. *Перевертов, В. П.* Технология обработки материалов концентрированным потоком энергии / В. П. Перевертов, И. К. Андрончев, М. М. Абулкасимов // *Надежность и качество сложных систем*. – 2015. – № 3(11). – С. 69–79.
8. *Юрков, Н. К.* Технология производства электронных средств : учебник / Н. К. Юрков. – 2-е изд., исправ. и доп. – СПб., 2014. – 480 с.
9. *Перевертов, В. П.* Система умной инфраструктуры РЖД и нанотехнологии / В. П. Перевертов, Н. К. Юрков // *Труды Международного симпозиума Надежность и качество*. – 2018. – Т. 1. – С. 100–102.
10. *Юрков, Н. К.* Физические основы получения катастрофического отказа в электрорадиокомпонентах и системах / Н. К. Юрков, Н. В. Горячев, Е. А. Кузина // *Труды Международного симпозиума Надежность и качество*. – 2018. – Т. 1. – С. 102–104.
11. *Мишанов, Р. О.* Выбор электрических параметров интегральных микросхем специального назначения для проведения индивидуального прогнозирования показателей качества и надежности / Р. О. Мишанов, М. Н. Пиганов, В. П. Перевертов // *Надежность и качество сложных систем*. – 2018. – № 2 (22). – С. 43–53.
12. *Абрамов, О. В.* Актуальность проблемы обеспечения надежности / О. В. Абрамов // *Надежность и качество сложных систем*. – 2014. – № 3 (7). – С. 3–7.
13. *Перевертов, В. П.* Качество продукции и услуг РЖД в сочетании в качеством управления / В. П. Перевертов, И. К. Андрончев, М. М. Абулкасимов // *Труды Международного симпозиума Надежность и качество*. – 2017. – Т. 2. – С. 116–120.
14. *Перевертов, В. П.* Система диагностирования и технического обслуживания НТТС и ПС в условиях РЖД / В. П. Перевертов, И. К. Андрончев, Н. К. Юрков // *Труды Международного симпозиума Надежность и качество*. – 2018. – Т. 2. – С. 93–95.
15. *Юрков, Н. К.* Оценка безопасности сложных технических систем / Н. К. Юрков // *Надежность и качество сложных систем*. – 2013. – № 2. – С. 15–21.

References

1. Perevertov V. P., Bocharov Yu. A., Markushin M. Ye. *Upravlenie kuznechnymi mashinami v GPS* [Management of forging machines in the GPS]. Kujbyshev: Kujbyshevskoe kn. izd-vo, 1987, 160 p.
2. Pervertov V. P. *Standartizaciya. Sertifikaciya: konspekt lekcij* [Metrology. Standardization. Certification: lecture notes]. 3rd ed. rev. and expanded. Samara: SamGUPS, 2017, 212 p.
3. Perevertov V. P., Bocharov Yu. A., Markushin M. E. et al. *Izobreteniya* [Inventions]. 1992, no. 39, p. 23.
4. Perevertov V. P. *Trudy mezh-dunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Works of the international symposium Reliability and quality]. 2006, pp. 155–158.
5. Chertykovtseva N. V., Ivanov A. V., Perevertov V. P. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2014, vol. 1, pp. 408–411.
6. Perevertov V. P., Andronchev I. K., Abulkasimov M. M. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Works of the international symposium Reliability and quality]. 2016, vol. 2, pp. 143–147.
7. Perevertov V. P., Andronchev I. K., Abulkasimov M. M. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnyh sistem* [Reliability and quality of complex systems]. 2015, no. 3 (11), pp. 69–79.
8. Yurkov N. K. *Tekhnologiya proizvodstva ehlektronnyh sredstv: uchebnik* [Technology of production of electronic tools: a textbook]. 2nd ed., corr. and suppl. Saint-Petersburg, 2014, 480 p.
9. Perevertov V. P., Yurkov N. K. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the international symposium Reliability and quality]. 2018, vol. 1, pp. 100–102.

10. Yurkov N. K., Goryachev N. V., Kuzina E. A. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2018, vol. 1, pp. 102–104.
11. Mishanov R. O., Piganov M. N., Pevertov V. P. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnyh sistem* [Reliability and quality of complex systems]. 2018, no. 2 (22), pp. 43–53.
12. Abramov O. V. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnyh sistem* [Reliability and quality of complex systems]. 2014, no. 3 (7), pp. 3–7.
13. Pevertov V. P., Andronchev I. K., Abulkasimov M. M. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2017, vol. 2, pp. 116–120.
14. Pevertov V. P., Andronchev I. K., Yurkov N. K. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2018, vol. 2, pp. 93–95.
15. Yurkov N. K. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnyh sistem* [Reliability and Quality of Complex Systems]. 2013, no. 2, pp. 15–21.

Перевертов Валерий Петрович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра наземных
транспортно-технологических средств,
Самарский государственный университет
путей сообщения
(443066, Россия, г. Самара,
Первый безымянный пер., 18)
E-mail: vpevertov@yandex.ru

Пиганов Михаил Николаевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра конструирования и технологии электрон-
ных систем и устройств,
Самарский национальный исследовательский уни-
верситет имени академика С. П. Королева
(443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34)
E-mail: kipres@ssau.ru

Юрков Николай Кондратьевич

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

Perevertov Valeriy Petrovich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of land transport
and technological means,
Samara State University
of Way of Communication
(443066, 18 Pervyy bezymyanny lane, Samara, Russia)

Piganov Mikhail Nikolaevich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of construction and technology
of electronic systems and devices department,
Samara National Research University
named after academician S. P. Korolev
(443086, 34 Moskovskoye highway, Samara, Russia)

Yurkov Nikolay Kondrat'evich

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

УДК 621.974.8

Перевертов, В. П.

Методика расчета быстродействующего исполнительного элемента кузнечно-штамповочной машины с системой диагностического управления / В. П. Перевертов, М. Н. Пиганов, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 3 (23). – С. 40–49. – DOI 10.21685/2307-4205-2018-3-6.

Д. Е. Демидов, Н. В. Будылина

ПОВЫШЕНИЕ ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

D. E. Demidov, N. V. Budyldina

IMPROVING LIFETIME OF WIRELESS SENSOR NETWORKS USING FUZZY LOGIC

Аннотация. Рассмотрен эффективный метод кластеризации в беспроводной сенсорной сети с использованием нечеткой логики на базе таких входных переменных, как качество принимаемого сигнала, концентрация узлов, остаточная энергия и центральность узла. Данный метод также сочетает в себе преимущества иерархии адаптивной кластеризации с низким энергопотреблением (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy, LEACH). Представлена структура моделируемой беспроводной сенсорной сети и аппарата нечеткой логики. Проведено сравнение предлагаемого метода с протоколами кластеризации LEACH и LEACH-FL. Моделирование беспроводной сенсорной сети и контроллера нечеткой логики проводилось в программной среде Matlab. Для сравнения с протоколами LEACH и LEACH-FL использовалась сеть размерностью 100×100 с выбранными 20 узлами. В результате моделирования и сравнения было выявлено, что предложенный алгоритм кластеризации обладает более высокой скоростью и низким энергопотреблением и, следовательно, позволяет увеличить время жизни беспроводной сенсорной сети. Данный метод кластеризации может быть использован в любых беспроводных сенсорных сетях, независимо от сферы их применения.

Ключевые слова: беспроводная сенсорная сеть, кластеризация, головной кластер, нечеткая логика, время жизни.

Abstract. The article considers efficient method of clustering in a wireless sensor network using fuzzy logic based on input variables such as the quality of the received signal, node concentration, remaining energy and node centrality. This method also combines the advantages of Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH). The structure of simulated wireless sensor network and fuzzy logic apparatus is presented. A comparison of the proposed method with the clustering protocols LEACH and LEACH-FL had been made. Modeling of Wireless sensor network and fuzzy logic controller was carried out in Matlab software environment. For comparison with the protocols of LEACH and LEACH-FL used the network dimensions of 100×100 with the 20 selected nodes. As a result of modeling and comparison it was revealed that the proposed clustering algorithm has a higher speed and low power consumption and, therefore, allows to increase the lifetime of the wireless sensor network. This clustering method can be used in any wireless sensor networks, regardless of their scope.

Key words: wireless sensor network, clustering, cluster head, fuzzy logic, lifetime.

В последние годы улучшение цифровой электроники, технологии строения полупроводников и беспроводной связи привело к развитию инструментария с малыми габаритами, низкой стоимостью и высокой мощностью с возможностью передачи данных, вычисления и отслеживания. Беспроводная сенсорная сеть (БСС) состоит из сотен или даже тысяч сенсорных датчиков, которые используют радиочастоты для выполнения задач отслеживания [1–5]. БСС состоят из большого числа сенсорных узлов (мотов) и базовой станции (БС). Сенсорные узлы собирают данные и передают их базовой станции, используя радиопередатчик. Сенсорные узлы обладают ограниченной мощностью и вычислительной способностью. БСС могут применяться в военных, биомедицинских и экологических отраслях.

Положение узлов не нужно предварительно рассчитывать. Это позволяет случайным образом располагать их в труднодоступных местностях или использовать для операций по оказанию помощи, которые требуют быстрого реагирования. С другой стороны, это означает, что сетевые протоколы и алгоритмы работы мотов должны обладать возможностью самоорганизации. Еще одной уникальной особенностью сенсорных сетей является совместная работа отдельных узлов. Моты

оснащены процессором. Поэтому вместо передачи исходных данных они могут их обрабатывать, выполняя простые вычисления и передавать далее только необходимые и частично обработанные данные. Описанные выше особенности обеспечивают широкий спектр применения сенсорных сетей. Такие сети можно применять в здравоохранении, для военных нужд и безопасности. Например, физиологические данные о пациенте могут контролироваться удаленно врачом. Это удобно как для пациента, так и для врача, позволяя понять его текущее состояние. Сенсорные сети могут быть использованы для выявления инородных химических агентов в воздухе и воде. Они могут помочь определить тип, концентрацию и расположение загрязнителей. В сущности, сенсорные сети позволяют лучше понять окружающую среду.

Однако БСС имеют ряд проблем в связи с их особенностями. Одной из таких проблем является ограниченное электроснабжение узлов. В большинстве случаев электроснабжение не восполняется. Таким образом, в БСС должны использоваться методы снижения энергопотребления узлов [1–3].

Данные, воспринимаемые сенсорными узлами, должны быть переданы станции для обработки и принятия решения. Эта станция называется базовой станцией или приемником.

Если каждый узел посылает данные напрямую приемнику, то расходуется много энергии. Поскольку значения, считанные узлами, расположенными рядом, немного различаются, существует вероятность избыточности отправленных данных.

Как упоминалось ранее, для отправления данных приемнику расходуется много энергии. В результате головные узлы сталкиваются с проблемой быстрого падения энергии. Как только головной узел отключается – часть сети или вся сеть перестает выполнять свои функции. Данная проблема решается двумя способами:

- 1) головные узлы оборудуются сменным, перезаряжаемым источником питания;
- 2) постоянная замена головного узла с целью снижения распределяемого энергопотребления сети [2].

В случае постоянной замены головного узла все узлы сети являются однородными. Каждый узел выбирает ближайший головной узел, в чем и заключается образование кластера.

В случае использования иерархии адаптивной кластеризации с низким энергопотреблением (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy, LEACH) два периода времени повторяются постепенно до тех пор, пока сеть не перестанет работать, которые можно определить как стадию формирования кластера и стадию стабильности [3].

Выбор головных узлов в LEACH осуществляется случайно, при этом каждый узел решает стать головным и сообщает об этом другим узлам. В предложенном методе головной узел выбирается на основании нескольких параметров и нечеткой системы. При данном методе случайного выбора не учитываются другие параметры, такие как остаточная энергия и расположение узлов. В этом случае создаваемые кластеры не всегда являются наилучшими. Например, если выбранный головной узел имеет низкий уровень энергии, то по истечении времени он может перейти в пассивное состояние, при этом остальные узлы должны потратить свою энергию для передачи данных этому головному узлу. Тем не менее LEACH обеспечивает равномерное распределение энергии от головных узлов и имеет высокую производительность.

С целью преодоления недостатков протокола LEACH в предложенном методе используется нечеткая система с соответствующими входными данными. Входными данными, рассматриваемыми в нечеткой системе, являются количество соседей, центральность, остаточная энергия, частота сигналов, полученных от соседей, и количество циклов, при которых узел не был головным. Эти параметры не так тесно связаны и могут легко работать с такими неоднородными характеристиками с помощью нечеткой логики. Кроме того, нечеткая система не требует сложных вычислений, поэтому она подходит для БСС.

На рис. 1 представлена стандартная архитектура БСС [4].

Узлы посылают данные соответствующему головному узлу, который осуществляет их сжатие и передает базовой станции. Организация БСС происходит на основании следующих принципов:

- базовая станция стационарна, располагается далеко от датчиков;
- все узлы в сети однородны и имеют ограниченную энергию;
- используется симметричное распределение узлов;
- базовая станция осуществляет выбор головного узла;
- узлы обладают малой подвижностью или не обладают вовсе.

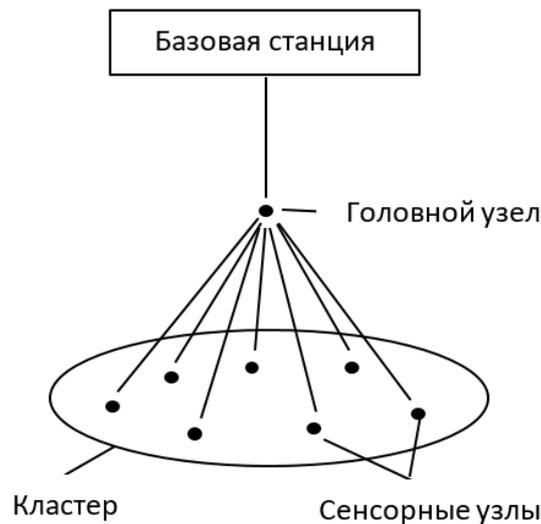


Рис. 1. Архитектура БСС

Принцип работы LEACH делится на раунды, и каждый раунд состоит из фазы формирования кластера и фазы передачи данных. В фазе формирования кластера осуществляется выбор головных узлов. Каждый сенсорный узел n генерирует случайное число от 0 до 1. Если это число меньше, чем $T(n)$, то сенсорный узел n может стать головным:

$$T(n) = \begin{cases} \frac{p}{1 - p \cdot (r \bmod \frac{1}{p})}, & n \in G \\ 0, & n \notin G \end{cases} \quad (1)$$

где p – процент головных узлов среди всех сенсорных узлов; r – текущий раунд; G – набор узлов, которые не были выбраны в качестве головных за последние $1/p$ раундов.

Оптимальное количество головных узлов оценивается в 5 % от общего числа сенсорных узлов. После выбора головных узлов, эти узлы осуществляют широковещательную рассылку сообщений остальным сенсорным узлам, которые затем выбирают головной узел на основании уровня принятого сигнала. Несмотря на то, что протокол LEACH способен увеличить время жизни сети, он имеет два существенных недостатка:

1) существует вероятность того, что может быть выбрано много головных узлов либо выбор головного узла не произойдет вовсе;

2) большинство головных узлов может быть расположено в определенной области, следовательно, они не выбираются распределенным образом.

В алгоритме, предложенном I. Gupta, нечеткая логика используется для нахождения головных узлов. Выбор головных узлов осуществляется на основании трех нечетких переменных – энергия узла, концентрация узла и его центральность. При таком подходе базовая станция в первую очередь собирает необходимую информацию со всех узлов, а затем выбирает головной узел в соответствии с нечеткими правилами. В данном случае в течение каждого раунда выбирается только один головной узел, в то время как для балансировки энергии и улучшения времени жизни сети требуется больше головных узлов [5].

Позднее J. Kim представил алгоритм CHEF, в котором выбор головных узлов также основан на нечеткой логике. Различие заключается в том, что в каждом раунде локально осуществляется выбор более одного головного узла. Набор нечетких переменных включает энергию узлов, а также их локальные расстояния. Также в алгоритме для каждого сенсора генерируется случайное число, и если оно меньше предустановленного порога, то определяется вероятность выбора конкретного узла. Таким образом, может быть несколько специализированных узлов, вероятность выбора которых снижается в случайном порядке [6].

D. De предложил метод, который использует нечеткий подход к выбору головного узла. Данный метод является централизованным, и сеть осведомлена о координатах узлов. Решение о выборе

узла в качестве головного выполняется приемником. Этот метод основан на трех переменных – остаточная энергия узла, концентрация узла и центральность – и принимает решение о назначении узла головным [7].

Heinzelman ввел так называемый метод LEACH-FL. Для выбора головного узла в методе используется нечеткая система с тремя входными величинами – заряд батареи, интенсивность узла и расстояние от приемника [8].

Эти методы являются централизованными, поэтому не подходят для сред, требующих обработки в реальном масштабе времени. Также много энергии расходуется узлами для передачи данных приемнику. При данных методах доступны координаты сети, поэтому узлы должны быть оснащены дополнительным аппаратным обеспечением, таким как система глобального позиционирования (Global Positioning System, GPS), которую невозможно использовать во всех средах.

С другой стороны, можно более эффективно использовать входные данные для нечеткой системы, чем в представленных методах, где имеет место распределенный способ, при котором каждый узел самостоятельно принимает решение, становится ему головным или нет. Данный метод работает во всех средах и поэтому нет необходимости в определении координат узлов. Этот метод, при котором выбираются подходящие входные данные для нечеткой системы, более эффективен, чем рассмотренные ранее, и при его применении будут созданы лучшие кластеры.

Нечеткая логика (Fuzzy Logic, FL) близка к логике человеческой мысли, которая значительно менее строгая, чем компьютерные вычисления. Нечеткая логика предлагает несколько уникальных функций, которые делают ее особенно хорошей альтернативой для многих проблем управления. Она по своей сути надежна, так как не требует точных входных значений и может быть запрограммирована на безопасный отказ [9].

Нечеткие множества описываются диапазоном реальных значений, по которым сопоставляется множество, называемое доменом, и функция принадлежности. Функция принадлежности назначает истинные (четкие) значения между 0 и 1 в каждой точке домена нечеткого множества. В зависимости от формы функции принадлежности могут применяться различные типы нечетких множеств, например, треугольные, бета, гауссовы, сигмовидные и т.д. Трапециевидные и треугольные функции принадлежности подходят для работы в режиме реального времени, потому что они не производят сложных вычислений, а также обладают достаточной точностью.

Нечеткая система состоит из трех частей: фаззификатора (*fuzzifier*), механизма логического вывода (*inference engine*) и дефаззификатора (*defuzzifier*). На рис. 2 представлены компоненты нечеткой системы, используемой в предлагаемом методе.

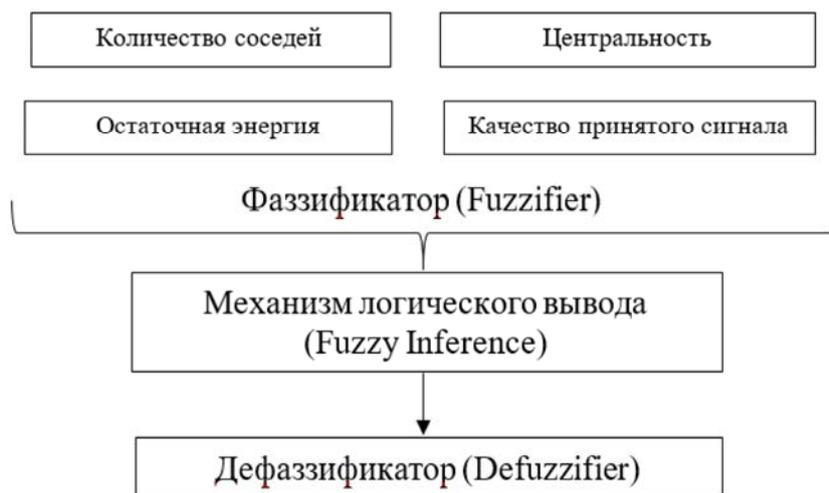


Рис. 2. Компоненты нечеткой системы

Фаззификатор (*Fuzzifier*) сопоставляет каждое четкое входное значение с соответствующими нечеткими множествами и таким образом присваивает ему значение истины или степень принадлежности для каждого нечеткого множества. Фаззифицированные значения обрабатываются механизмом логического вывода, который состоит из базы правил и различных методов для определения правила.

База правил представляет собой набор правил вида «ЕСЛИ-ТО», которые касаются входных и выходных нечетких переменных с использованием лингвистических переменных, каждая из которых описывается с помощью нечетких множеств и нечетких операторов импликации, таких как «И», «ИЛИ» и т.д.

Дефаззификатор (*defuzzifier*) осуществляет дефаззификацию в области нечетких решений. Он находит единственное выходное нечеткое значение на области нечетких решений. Наиболее популярны следующие методы дефаззификации:

- метод центра площади (Center of Area, COA);
- метод центра тяжести (Center of Gravity, COG);
- расширенный метод центра площади (Extended Center of Area, ECOA);
- метод среднего максимума (Mean of Maxima, MeOM).

В данной статье для фаззификации используется метод COA, который является простейшим и широко используемым методом. Этот метод является быстрым, поскольку в нем используются только простые операции, также он делает возможным постоянное изменение значения дефаззификации, поэтому метод удобен для использования в нечетких контроллерах [10].

Входы нечеткой системы являются четкими числами, которые затем преобразуются в нечеткие значения функции принадлежности. Узлы просто определяют эти входные значения. Узлы получают информацию от соседних узлов о расстоянии до них, как только один из соседей отправляет или получает данные. Предположим, что количество головных узлов составляет 5 % от общего количества сенсоров в каждом раунде.

Параметрами, играющими основную роль в выборе головного узла, являются:

- количество соседей (концентрация) – узел выбирается в качестве головного, если он находится в центре кластера и через него проходит много сигналов. Максимальное количество соседей N_{max} определяется по формуле

$$N_{max} = n - 1, \tag{2}$$

где n – количество сенсорных узлов в кластере;

- остаточная энергия – узел обладает максимальным уровнем энергии, поскольку энергопотребление головного узла больше, чем у остальных узлов.

Энергия, затрачиваемая на передачу (E_{TX}) и прием (E_{RX}), определяется соответственно по формулам

$$E_{TX}(l, d) = \begin{cases} lE_{elec}^{TX} + l\epsilon_{fs}d^2, & d < d_0 \\ lE_{elec}^{TX} + l\epsilon_{mp}d^4, & d \geq d_0 \end{cases}, \tag{3}$$

$$E_{RX}(l) = lE_{elec}^{RX}, \tag{4}$$

где l – размер пакета; E_{elec}^{TX} – энергия, необходимая для работы электронной схемы передатчика; E_{elec}^{RX} – энергия, требуемая для работы электронной схемы приемника; d – расстояние между передатчиком и приемником; $d_0 = \sqrt{\epsilon_{fs}/\epsilon_{mp}}$ – пороговое расстояние между передатчиком и приемником; ϵ_{fs} – постоянное усиление; ϵ_{mp} – мультисетевая постоянная;

- центральность – ближайшим сенсором к центру тяжести кластера является узел, среднее расстояние от которого до других узлов минимально. Центральность головного узла приводит к снижению энергопотребления для связи внутри кластера (между узлами-членами и головным узлом);

- качество принятых сигналов – данный критерий базируется на том, какой из узлов получает больше энергии сигнала – количество сигналов, исходящих из этого узла, определяет его качество как головного.

Определение качества приема легко выполняется с использованием метода индикации силы принятого сигнала (Received Signal Strength Indication, RSSI) [3].

Функции принадлежности, преобразующие входные четкие значения в нечеткие, представлены на рис. 3.

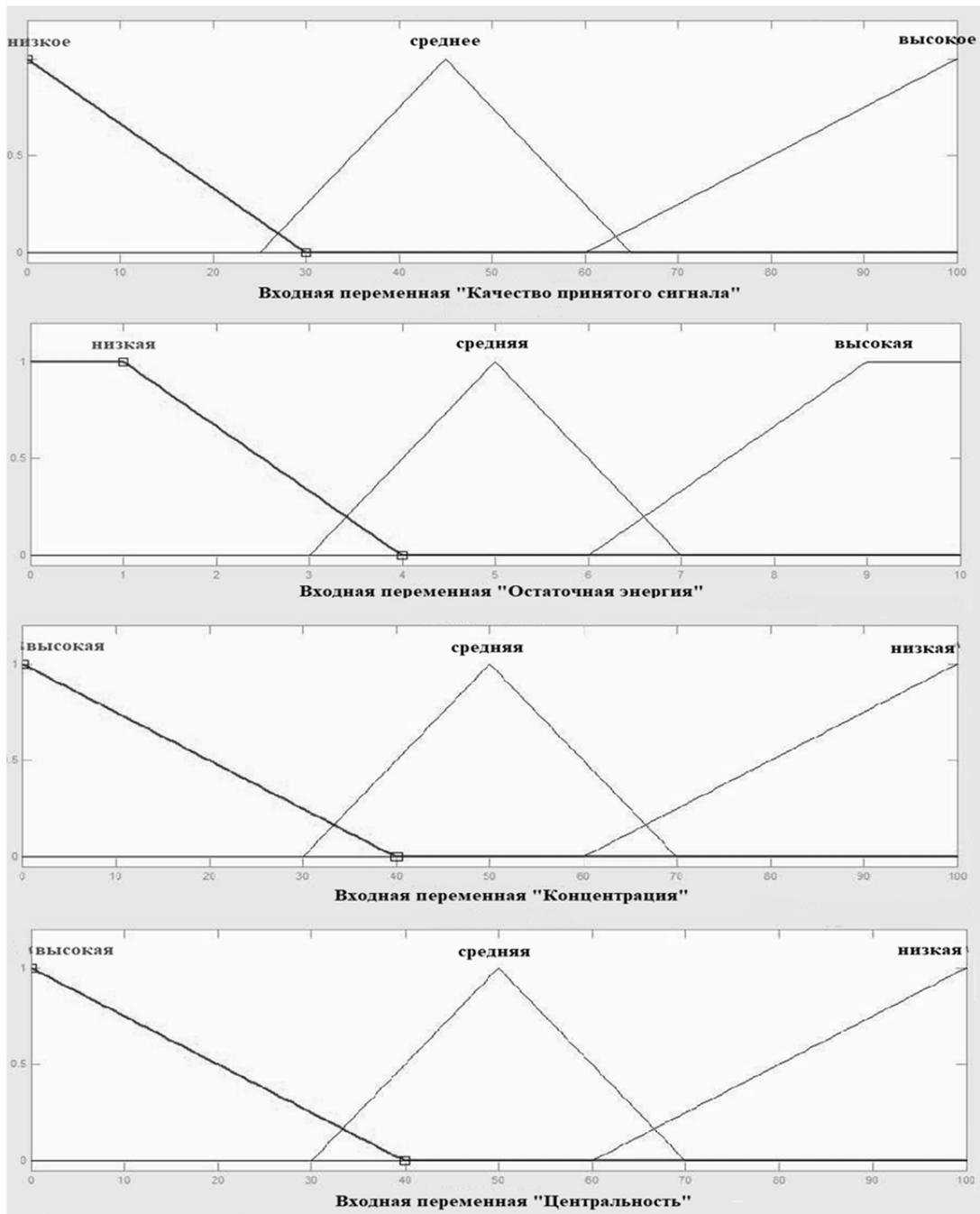


Рис. 3. Функции принадлежности для входных нечетких переменных

На этапе нечеткого вывода используется метод Мамдани для определения выходных данных. Правила, используемые в методе Мамдани, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Некоторые правила нечеткого вывода для выбора головного узла

Если Концентрация	И Остаточная энергия	И Центральность	И Качество сигнала	Тогда Вероятность выбора головного узла
1	2	3	4	5
Низкая	Низкая	Низкая	Низкое	Минимальная
Низкая	Низкая	Низкая	Среднее	Очень низкая
Низкая	Низкая	Высокая	Высокое	Низкая

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5
Низкая	Средняя	Низкая	Низкое	Очень низкая
Низкая	Средняя	Высокая	Высокое	Средняя
Низкая	Высокая	Низкая	Низкое	Низкая
Средняя	Средняя	Высокая	Высокое	Высокая
Средняя	Высокая	Низкая	Низкое	Средняя
Средняя	Высокая	Высокая	Высокое	Очень высокая
Высокая	Средняя	Средняя	Низкое	Высокая
Высокая	Средняя	Средняя	Среднее	Высокая
Высокая	Средняя	Средняя	Высокое	Очень высокая
Высокая	Средняя	Высокая	Низкое	Очень высокая
Высокая	Высокая	Высокая	Высокое	Максимальная

Чтобы преобразовать полученный нечеткий результат в четкий, используется функция принадлежности, представленная на рис. 4.



Рис. 4. Выходная функция принадлежности

Для дефазификации выходных данных используется метод центра площади (COA). Порог значения α определяется по формуле

$$\alpha = \frac{\int z \mu_A(z) dz}{\int \mu_A(z) dz}, \tag{5}$$

где α – четкое выходное значение для нечеткой системы z ; $\mu_A(z)$ – агрегированная выходная функция принадлежности.

Моделирование проводилось с использованием программного пакета Matlab.

Для сравнения с протоколами LEACH и LEACH-FL использовалась сеть размерностью 100×100 с выбранными 20 узлами. Координаты базовой станции – (50; 200), а энергетические параметры представлены в табл. 2.

Таблица 2

Энергетические параметры системы

E_s , Дж	Постоянное усиление ϵ_{fs} , пДж/(бит·м ²)	Требуемая энергия E_{elec} , нДж/бит	Мультисетевая постоянная ϵ_{mp} , пДж/(бит·м ⁴)
0,5	10	50	0,0013

На рис. 5 показано различие между предлагаемым методом и протоколами LEACH и LEACH-FL с точки зрения энергопотребления.

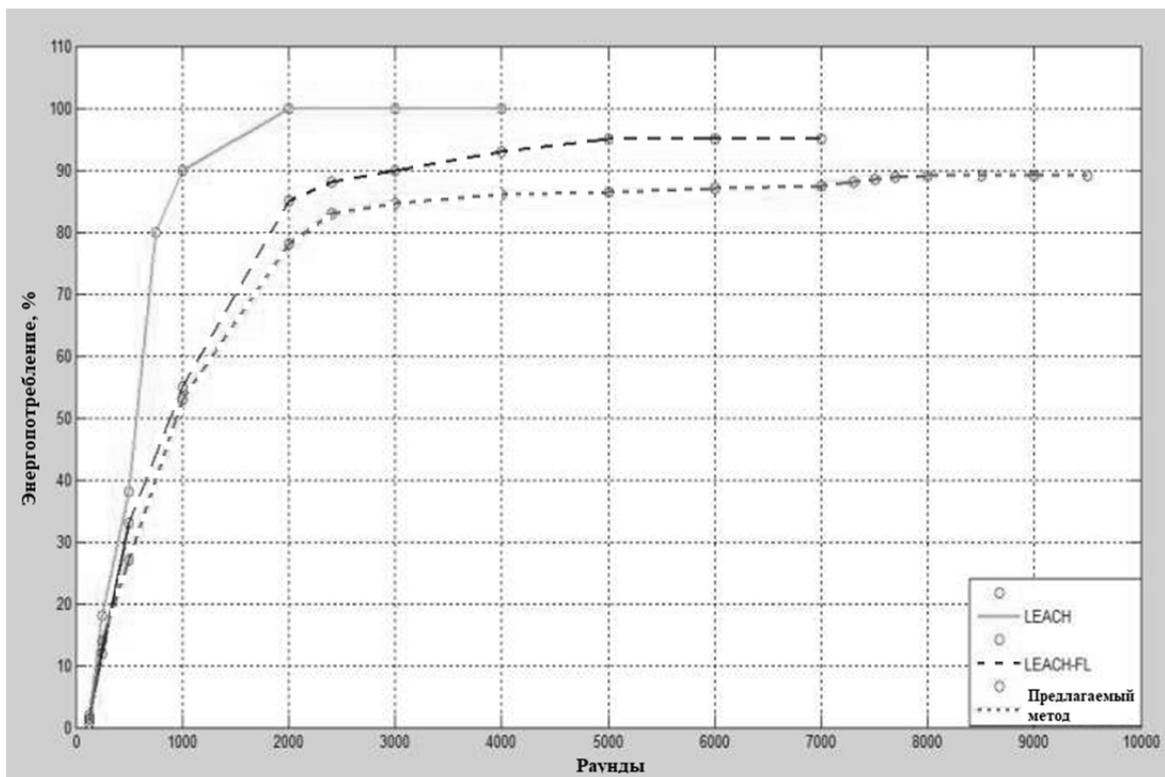


Рис. 5. Зависимость энергопотребления от количества раундов для каждого алгоритма

Остаточная энергия сети в каждом раунде является хорошей метрикой для измерения энергоэффективности алгоритмов. Менее крутой график говорит о сбалансированности энергопотребления и эффективном распределении энергии между узлами.

Как видно на графике, с использованием данного метода потребляется меньше энергии в сравнении с LEACH и LEACH-FL, следовательно, такая сенсорная сеть будет обладать большим временем жизни.

Поскольку все операции по формированию кластера выполняются локально, экономится большое количество энергии и увеличивается скорость формирования кластера. Поэтому метод кластеризации сочетает в себе достоинства протокола LEACH и нечеткой логики с небольшими вычислительными затратами.

Таким образом, данный алгоритм кластеризации на базе нечеткой логики обладает более высокой скоростью и низким энергопотреблением и, следовательно, повышает время жизни беспроводной сенсорной сети.

Библиографический список

1. Akkaya, K. A Survey of Routing Protocols in Wireless Sensor Networks / K. Akkaya, M. Younis // *Ad Hoc Network Journal*. – 2005. – Vol. 3/3. – P. 325–349.
2. Al-Karak, J. N. Routing techniques in wireless sensor network: A survey / J. N. Al-Karak, A. E. Karmal // *IEEE wireless communications*. – 2004. – Vol. 11. – P. 6–28.
3. Akyildiz, I. F. Wireless sensor networks: a survey / I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci // *Computer Networks*. – 2002. – Vol. 38. – P. 393–422.
4. Dastgheib, S. J. An Efficient Approach for Clustering in Wireless Sensor Network Using Fuzzy Logic / S. J. Dastgheib, H. Oulia, M. R. S. Ghassami // *International Conference on Computer Science and Network Technology*. – Harbin, China, 2011. – P. 256–260.
5. Gupta, I. Cluster-head Election using Fuzzy Logic for Wireless Sensor Networks / I. Gupta, D. Riordan, S. Sampalli // *Proceedings of the 3rd Annual Communication Networks and Services Research Conference*. – Washington, DC, USA, 2005. – P. 255–260.
6. Myoung Kim, J. CHEF: Cluster Head Election mechanism using Fuzzy logic in Wireless Sensor Networks / J. Myoung Kim, S. Park, Y. Han, T. Chung // *10th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT)*. – Gangwon-Do, South Korea, 2008. – P. 654–659.

7. De, D. A Distributed Algorithm for Localization Error Detection-Correction, Use in In-network Faulty Reading Detection: Applicability in Long-Thin Wireless Sensor Networks / D. De // Conference IEEE. – Budapest, Hungary, 2009. – P. 568–571.
8. Heinzelman, A. Chandrakasan and H. Balakrishnan, An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks // IEEE Transactions on Wireless communications. – 2002. – P. 660–670.
9. Vanheel, F. Automated Linear Regression Tools Improve RSSI WSN Localization in Multipath Indoor Environment / F. Vanheel, J. Verhaevert // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. – 2011. – Vol. 2011/2011. – P. 1–27.
10. Saletic, D. Z. Analysis of Basic Defuzzification Techniques / D. Z. Saletic, D. M. Velasevic, N. E. Mastorakis // Recent Advances in Computers, Computing and Communications. – N.Y. :WSEAS Press, 2002. – P. 247–252.

References

1. Akkaya K., Younis M. *Ad Hoc Network Journal*. 2005, vol. 3/3, pp. 325–349.
2. Al-Karak J. N., Karmal A. E. *IEEE wireless communications*. 2004, vol. 11, pp. 6–28.
3. Akyildiz I. F., Su W., Sankarasubramaniam Y., Cayirci E. *Computer Networks*. 2002, vol. 38, pp. 393–422.
4. Dastgheib S. J., Oulia H., Ghassami M. R. S. *International Conference on Computer Science and Network Technology*. Harbin, China, 2011, pp. 256–260.
5. Gupta I., Riordan D., Sampalli S. *Proceedings of the 3rd Annual Communication Networks and Services Research Conference*. Washington, DC, USA, 2005, pp. 255–260.
6. Myoung Kim J., Park S., Han Y., Chung T. *10th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT)*. Gangwon-Do, South Korea, 2008, pp. 654–659.
7. De D. *Conference IEEE*. Budapest, Hungary, 2009.
8. Heinzelman A. *IEEE Transactions on Wireless communications*. 2002, pp. 660–670.
9. Vanheel F., Verhaevert J. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*. 2011, vol. 2011/2011, pp. 1–27.
10. Saletic D. Z., Velasevic D. M., Mastorakis N. E. *Recent Advances in Computers, Computing and Communications*. N.Y.: WSEAS Press, 2002, pp. 247–252.

Демидов Дмитрий Евгеньевич

старший преподаватель,
кафедра общепрофессиональных дисциплин
технических специальностей,
Уральский институт связи и информатики
(620109, Россия, г. Екатеринбург, ул. Репина, 15)
E-mail: demidovde@mail.ru

Demidov Dmitry Evgenievich

senior lecturer,
sub-department of general professional disciplines
of technical specialties,
Ural Institute of Communications and Informatics
(620109, 15 Repin steet, Ekaterinburg, Russia)

Будылина Надежда Вениаминовна

кандидат технических наук, профессор,
кафедра общепрофессиональных
дисциплин технических специальностей,
Уральский институт связи и информатики
(620109, Россия, г. Екатеринбург, ул. Репина, 15)
E-mail: bnv@mail.ru

Budyldina Nadezhda Veniaminovna

candidate of technical sciences, professor,
sub-department of general professional disciplines
of technical specialties,
Ural Institute of Communications and Informatics
(620109, 15 Repin steet, Ekaterinburg, Russia)

УДК 519.87:621.035

Демидов, Д. Е.

Повышение времени жизни беспроводных сенсорных сетей с использованием нечеткой логики / Д. Е. Демидов, Н. В. Будылина // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 3 (23). – С. 50–58. – DOI 10.21685/2307-4205-2018-3-7.

С. В. Поршневу, Н. В. Будилина, К. Л. Стойчин, А. В. Шабров

ОБ ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КОРПОРАТИВНЫХ КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ

S. V. Porshnev, N. V. Budyldina, K. L. Stoychin, A. V. Shabrov

THE ESTIMATION OF EFFICIENCY OF FUNCTIONING OF NETWORKS

Аннотация. *Актуальность и цели.* Показано, что при неправильной настройке компьютерных сетей (КС) для пользователя может оказаться недоступной часть сервисов. Дан анализ существующих подходов к решению данной задачи. Общим недостатком является отсутствие учета особенностей архитектуры КС при оценке эффективности КС. Поставлена и решена актуальная задача обоснованного выбора критериев оценки функционирования КС, учитывающих особенности архитектуры сети. Предложено научное обоснование выбора данных критериев и приведены соответствующие оценки, подтверждающие правомерность их выбора. Получен критерий эффективности функционирования КС, основанный на анализе на времени ее реакции. Показано, что коэффициент готовности КС зависит от конкретного сервиса, к которому обратился пользователь, месте положения соответствующего компьютера в КС, на котором размещен данный сервис, архитектуры КС и загруженности сегментов КС, через которые передается запрос и ответ на него. При этом неприемлемо большее с точки зрения пользователя время реакции КС, зачастую трактуемое пользователем как сбой в работе сетевого приложения, что закономерно приводит к невыполнению им решаемой задачи, как правило, обусловлено обработкой данных на верхних уровнях модели взаимодействия открытых систем, которые не имеют непосредственного отношения к процессам и, собственно, качеству функционирования КС, но определяют загруженность клиентов. Приведены критерии оценки производительности сети. Для подтверждения работоспособности выбранных критериев оценивания функционирования КС было проведено моделирование в системе OpNET Modeller. Приведена методика моделирования компьютерной сети. *Результаты и выводы.* Результаты отражены в виде графика зависимости времени задержки от времени измерений для однорангового сегмента компьютерной сети. Значения времен задержек сведены в таблицу. Показано, что значение критериев действительно оказывается зависимым от архитектуры однорангового сегмента компьютерной сети. Таким образом, в работе обоснован выбор для оценивания функционирования сети. Работоспособность предложенных критериев подтверждена результатами имитационного моделирования и аналитическими оценками.

Abstract. It is shown that if the computer networks (CS) are incorrectly configured, a part of the services may not be available to the user. An analysis of existing approaches to solving this problem is given. A common disadvantage is the lack of consideration of the characteristics of the architecture of the COP when assessing the effectiveness of the COP. The actual problem of a reasonable choice of criteria for evaluating the functioning of the CS, taking into account the network architecture features, has been set and solved. A scientific substantiation of the choice of these criteria is proposed and the corresponding estimates confirming the validity of their choice are given. A criterion for the effectiveness of the functioning of the CS, based on an analysis of the time of its reaction, was obtained. It is shown that the availability factor of the CS depends on the specific service that the user turned to, the location of the corresponding computer in the CS where the service is located, the CS architecture and the workload of the CS segments through which the request and response is transmitted. At the same time, the response time of the CS, which is often interpreted by the user as a failure of the network application, is unacceptable from the user's point of view, which naturally leads to the failure of the solved task, as a rule, due to data processing at the upper levels of the open systems interaction model. relationship to the processes and, in fact, the quality of the functioning of the COP, but determined by the workload of customers. Criteria for evaluating network performance are given. To confirm the efficiency of the selected criteria for evaluating the functioning of the CS, the OpNET Modeller system was simulated. The technique of computer network modeling is given. The results are shown as a graph of the dependence of the delay time on the measurement time for the peer-to-peer segment of the computer network. The delay times are tabulated. It is shown that the value of the criteria really turns out to be dependent on the architecture of the peer-to-peer segment of a computer network. Thus, the work justified the choice for evaluating the functioning of the network. The performance of the proposed criteria is confirmed by the results of simulation and analytical assessments.

Ключевые слова: компьютерная сеть, эффективность КС, критерии эффективности КС.

Key words: corporate network, data transmission, threshold criterion, weighted average criterion, time between failures, recovery time.

Введение

При неправильной настройке компьютерных сетей (КС), как показывает анализ опыта администрирования КС, для пользователя КС может оказаться недоступной часть сервисов. В этой связи возникает необходимость оценивания эффективности функционирования КС. При этом следует использовать некоторый набор количественных показателей, учитывающих в том числе и архитектуру КС [1, 2].

Известен ряд работ, в которых предложены те или иные критерии эффективности КС. Например, в работе [2] на основе представления КС в виде направленного графа эффективность КС предложено оценивать по суммарному весу всех связей данного графа, а также по значению суммарной задержки передаваемых пакетов (соответственно, эффективной по данному критерию из имеющегося множества КС считается КС, имеющая наименьшее значение данного показателя), в [3] – по степени безошибочности передачи в сети информационной единицы за минимальное время, в [4] – по $V_{\text{ПД}}$ – пропускной способности КС (среднему потоку данных, фактически передаваемых через КС, Мбит/с), $T_{3С}$ – задержкам доставки в КС сообщения от отправителя к получателю, вносимыми в передачу данных пользователя, $V_{\text{Ф}}$ – скорости передачи фреймов (коротких сообщений длиной 1000–2000 бит), $T_{3С} = f(V_{\text{ПД}})$ – зависимости времени задержки сообщения в КС от ее средней пропускной способности [4].

Общий недостаток данных подходов заключается в том, что они при оценке эффективности КС не учитывают особенности ее архитектуры. В этой связи задача обоснованного выбора критериев для оценки функционирования КС, учитывающего особенности архитектуры КС, является актуальной. В статье изложено научное обоснование выбора данных критериев и приведены соответствующие оценки, подтверждающие правомерность их выбора.

Критерий эффективности функционирования КС, основанный на анализе времени ее реакции

С точки зрения пользователя (клиента КС) время, затрачиваемое им на решение конкретной задачи с помощью выбранного сервиса, определяется временем ожидания реакции КС на тот или иной запрос пользователя (с точки зрения теории надежности – время исправной работы объекта) t_p и временем непосредственного взаимодействия пользователя с сервисом t_w – временным интервалом между обращением к некоторому ресурсу КС (с точки зрения теории надежности – время вынужденного простоя объекта). Следовательно, качество функционирования данного сервера можно количественно оценить отношением $t_w / (t_w + t_p)$, называемым далее коэффициентом готовности КС.

При этом понятно, что коэффициент готовности КС зависит от конкретного сервиса, к которому обратился пользователь, месте положения соответствующего компьютера в КС, на котором размещен данный сервис, архитектуры КС и загруженности сегментов КС, через которые передается запрос и ответ на него. Неприемлемо большое с точки зрения пользователя время реакции КС, зачастую трактуемое пользователем как сбой в работе сетевого приложения, что закономерно приводит к невыполнению им решаемой задачи, как правило, обусловлено обработкой данных на верхних уровнях модели взаимодействия открытых систем [3], которые не имеют непосредственного отношения к процессам и, собственно, качеству функционирования КС, но определяются загруженностью клиентов.

Данный подход можно обобщить для случая КС со сложной архитектурой, если использовать суммарное время функционирования КС и суммарное время вынужденного простоя:

$$K_w = \frac{\sum t_w}{\sum t_w + \sum t_p}. \quad (1)$$

При наличии статистической информации о значениях t_w и t_p , полученных экспериментально, для оценки качества функционирования компьютерных сетей можно использовать оценки математических ожиданий данных величин (t_{cp} и $t_{\text{в}}$ соответственно):

$$K_g = \frac{t_{cp}}{t_{cp} + t_b}$$

Критерии оценки производительности сети

КС, которую используют несколько клиентов, обращающихся к нескольким сервисам через различные серверы, можно характеризовать множеством времен реакции КС при обращении i -го клиента j -му серверу через k -й сервис $\{T_{i,j,k}\}$. Тогда, как очевидно, ее производительность количественно можно оценить с помощью средневзвешенного критерия

$$K_c = \frac{\sum_{i,j,k} T_{i,j,k}}{N}, \quad (2)$$

где N – количество обращений клиентов КС или с помощью критерия наибольшей загрузки:

$$K_3 = \max\{T_{i,j,k}\}. \quad (3)$$

Соответственно из двух КС производительность функционирования оказывается выше у той КС, у которой меньше значения K_c, K_3 , вычисляемые в соответствии с (2), (3).

Для подтверждения работоспособности выбранных критериев оценивания функционирования КС было проведено моделирование КС в программе OpNET Modeller [4], результаты которого обобщаются в следующем разделе.

Методика моделирования компьютерной сети

В проведенных экспериментальных исследованиях были изучены КС, архитектура которых представлена на рис. 1 и 2. Здесь каждый из одноранговых сегментов КС состоял из шестидесяти узлов, двух серверов и шести коммутаторов.

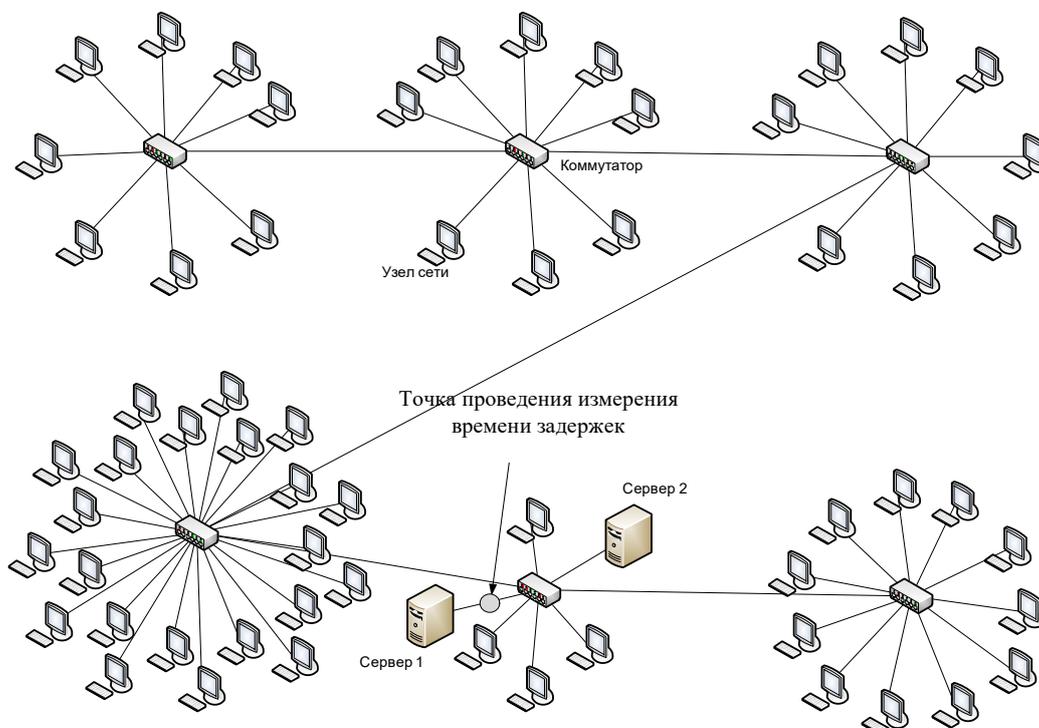


Рис. 1. Одноранговый сегмент компьютерной сети № 1

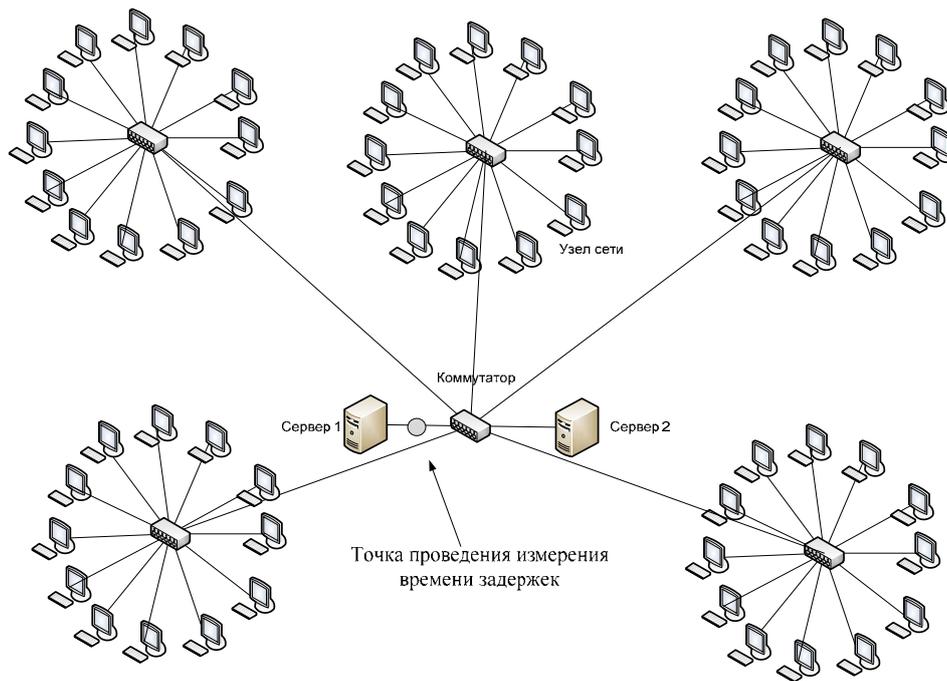


Рис. 2. Одноранговый сегмент компьютерной сети № 2

При проведении моделирования компьютерных сетей использовалась методика, реализующаяся следующей последовательностью действий:

- 1) задание числа активных пользователей КС;
- 2) генерация запросов каждым из выбранных пользователей на скачивание файлов или начала сеанса потокового дуплексного видео по протоколу UDP;
- 3) получение ответов от серверов на запросы, сгенерированные пользователями КС;
- 4) измерение задержек в одноранговых сегментах в выбранной точке КС;
- 5) вычисление значений выбранных критериев функционирования КС.

Типичные результаты изменения значений времени задержки распространения сигнала в КС с архитектурой № 1 и архитектурой № 2 в течение шести часов представлены на рис. 3.

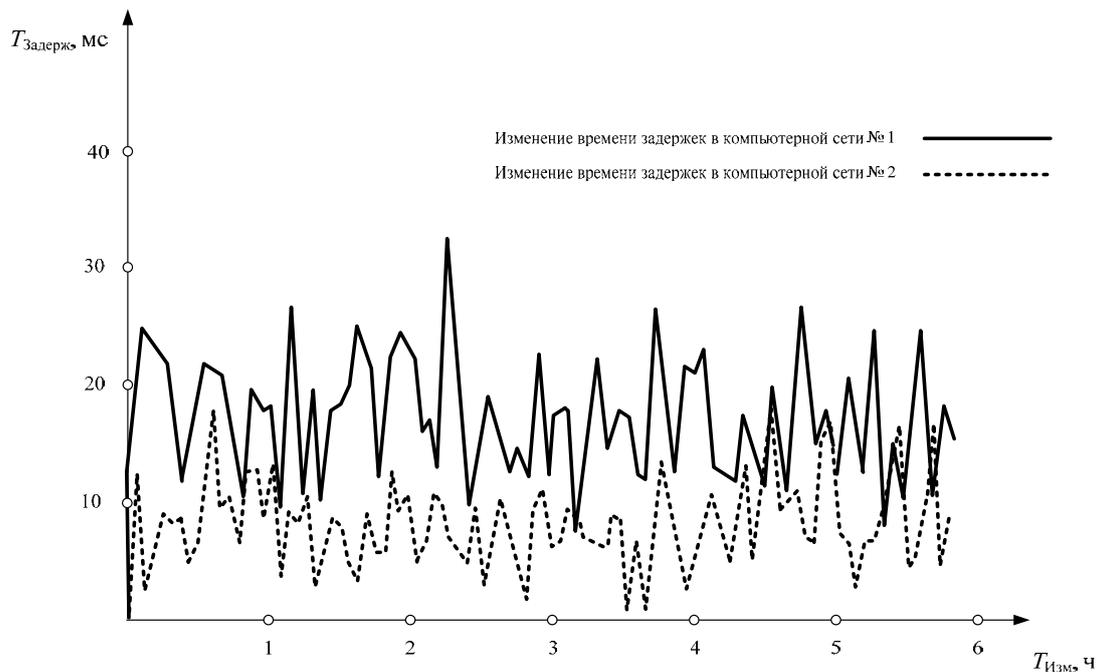


Рис. 3. Зависимость времени задержки от времени измерений

Из рис. 1 видно, что время задержки зависит от архитектуры КС.

Также были вычислены значения предложенных выше критериев (табл. 1).

Для подтверждения результатов моделирования получим аналитическую оценку значений данных критериев.

Рассмотрим случай, когда количество пользователей сети, генерирующих запросы к серверу, равняется 6.

Расчет критериев для первой топологии выглядит следующим образом: при взаимодействии с одним сервером время реакции определяется временем обработки коммутатором запроса $T_{рк}$, так как время доставки по линии связи кадра от источника кадра к коммутатору незначительно, поэтому [5]:

$$K_{c1} = \frac{\sum_i^6 T_i}{8} = 2,125 \cdot T_{рк};$$

$$K_{z1} = \max(5T_{рк}, 4T_{рк}, 3T_{рк}, 2T_{рк}, T_{рк}, 2T_{рк}) = 5T_{рк}.$$

Расчет критериев для второй топологии выглядит следующим образом:

$$K_{c2} = \frac{\sum_i^6 T_i}{8} = 1,5 \cdot T_{рк};$$

$$K_{z2} = \max(3T_{рк}, 2T_{рк}, 3T_{рк}, 2T_{рк}, 2T_{рк}, 3T_{рк}) = 3T_{рк}.$$

Значения времен задержек для обеих архитектур приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значение времен задержек

$T_{зд}, \text{ Мс}$		Время измерения
Топология 2	Топология 1	
9,3	18,6	60 мин
11,2	25,6	120 мин
7,4	12,3	180 мин
4,2	21,9	240 мин
6,1	12,2	300 мин
8,0	14,9	345 мин

Значения выбранных параметров представлены в табл. 1.

Отметим, что величина вносимой коммутатором задержки зависит от используемого в нем метода коммутации. Существуют коммутаторы, которые осуществляют коммутацию без буферизации, они вносят задержки от 5 до 40 мкс, а коммутаторы, работающие с полной буферизацией кадров, – от 50 до 200 мкс для кадров минимальной длины [6].

В результате можно сказать, что значения времен задержек, представленные в табл. 1, соответствуют справочным данным и значение критериев действительно оказывается зависимым от архитектуры однорангового сегмента компьютерной сети.

Заключение

В настоящей статье обоснован выбор критериев оценивания функционирования сети. Работоспособность предложенных критериев подтверждена результатами имитационного моделирования сети в пакете OpNet Modeller и аналитическими оценками.

Библиографический список

1. Ахо, А. В. Структуры данных и алгоритмы / А. В. Ахо, Д. Э. Хопкрофт, Д. Д. Ульман. – М. ; СПб. ; Киев : Вильямс, 2001.
2. Плесовских, И. Б. Оптимизация вычислительных сетей при помощи генетического алгоритма / И. Б. Плесовских // Вестник Омского университета. – 2013. – Вып. 52.

3. Чабаненко, П. П. Методология оценки сетей связи / П. П. Чабаненко // Вестник Омского университета. – 2016. – Вып. 68.
4. URL: http://www.opnet.com/university_program/itguru_academic_edition/install_software.html (дата обращения 12.03.2018).
5. Кормен, Т. Х. Алгоритмы: построение и анализ / Т. Х. Кормен, Ч. И. Лейзерсон, Р. Л. Ривест, К. Штайн. – 3-е изд. – М. : Вильямс, 2013.
6. Олифер, В. Г. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы / В. Г. Олифер, Н. А. Олифер. – 4-е изд. – СПб. : Питер, 2010.

References

1. Aho A. V., Hopcroft D. E., Ulman D. D. *Struktury dannyh i algoritmy* [Data Structures and Algorithms]. Moscow; Saint-Petersburg; Kiev: Vil'yams, 2001.
2. Plesovskih I. B., *Vestnik Omskogo universiteta* [Bulletin of Omsk University]. 2013, iss. 52.
3. Chabanenko P. P. *Vestnik Omskogo universiteta* [Omsk University Bulletin]. 2016, iss. 68.
4. Available at: http://www.opnet.com/university_program/itguru_academic_edition/install_software.html (accessed Mar. 12, 2018)
5. Cormen T. H., Leiserson C. I., Rivest R. L., Stein C. *Algoritmy: postroenie i analiz* [Algorithms: construction and analysis]. 3rd ed. Moscow: Vil'yams, 2013.
6. Olifer V. G., Olifer N. A. *Komp'yuternye seti. Printsipy, tekhnologii, protokoly* [Computer network. Principles, technologies, protocols]. 4th ed. Saint-Petersburg: Piter, 2010.

Поршнев Сергей Владимирович

доктор технических наук, профессор,
кафедра общепрофессиональных дисциплин
технических специальностей,
Уральский институт связи и информатики
(620109, Россия, г. Екатеринбург, ул. Репина, 15)
E-mail: sergey_porshnev@mail.ru

Будылина Надежда Вениаминовна

кандидат технических наук, профессор,
кафедра общепрофессиональных дисциплин
технических специальностей,
Уральский институт связи и информатики
(620109, Россия, г. Екатеринбург, ул. Репина, 15)
E-mail: bnv@mail.ru

Стойчин Красимир Людмилов

аспирант,
Уральский институт связи и информатики
(620109, Россия, г. Екатеринбург, ул. Репина, 15)
E-mail: k001kk96@mail.ru

Шабров Андрей Вениаминович

аспирант,
Уральский институт связи и информатики
(620109, Россия, г. Екатеринбург, ул. Репина, 15)
E-mail: shabrov-av@yandex.ru

Porshnev Sergey Vladimirovich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of general professional disciplines
of technical specialties,
Ural Institute of Communications and Informatics
(620109, 15 Repin street, Ekaterinburg, Russia)

Budyldina Nadezhda Veniaminovna

candidate of technical sciences, professor,
sub-department of general professional disciplines
of technical specialties,
Ural Institute of Communications and Informatics
(620109, 15 Repin street, Ekaterinburg, Russia)

Stoichin Krasimir Ludmilov

postgraduate student,
Ural Institute of Communications and Informatics
(620109, 15 Repin street, Ekaterinburg, Russia)

Shabrov Andrey Veniaminovich

postgraduate student,
Ural Institute of Communications and Informatics
(620109, 15 Repin street, Ekaterinburg, Russia)

УДК 004.732

Поршнев, С. В.

Об оценке эффективности функционирования корпоративных компьютерных сетей / С. В. Поршнев, Н. В. Будылина, К. Л. Стойчин, А. В. Шабров // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 3 (23). – С. 59–64. – DOI 10.21685/2307-4205-2018-3-8.

В. О. Семенец, М. П. Трухин

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫМИ АППАРАТАМИ

V. O. Semenets, M. P. Trukhin

METHODS OF CO-OPERATION WITHOUT FLAMMABLE AIRCRAFT

Аннотация. Сегодня на рынке большое количество различных систем управления беспилотными летательными аппаратами, они доступны для потребителя в любом ценовом сегменте. Нашей задачей будет рассмотреть основные типы систем в различных ценовых сегментах и сравнить их, выделить главные протоколы взаимодействия между станцией и летательным аппаратом, а также провести эксперимент с реальной станцией радиоуправления и замерить основные параметры сигнала.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, система управления беспилотным летательным аппаратом, параметры сигнала, сравнение станций радиосвязи.

Abstract. Today the market has a large number of different control systems for unmanned aerial vehicles, they are available to the consumer in any price segment. Our task will be to consider the main types of systems in different price segments and compare them, as well as to highlight the main protocols of interaction between the station and the aircraft, as well as to conduct an experiment with a real radio control station and to stop the main signal parameters.

Key words: unmanned aerial vehicle, control system of an unmanned aerial vehicle, signal parameters, comparison of radio communication stations.

Общий принцип взаимодействия между станцией управления и беспилотным аппаратом и сравнение различных типов станций

Чтобы разработать эффективную систему радиопротиводействия беспилотным летательным аппаратам, необходимо определить основные типы систем радиосвязи между оператором и беспилотным аппаратом [1, 2].

Для начала приведем базовую схему управление беспилотным летательным аппаратом (рис. 1).

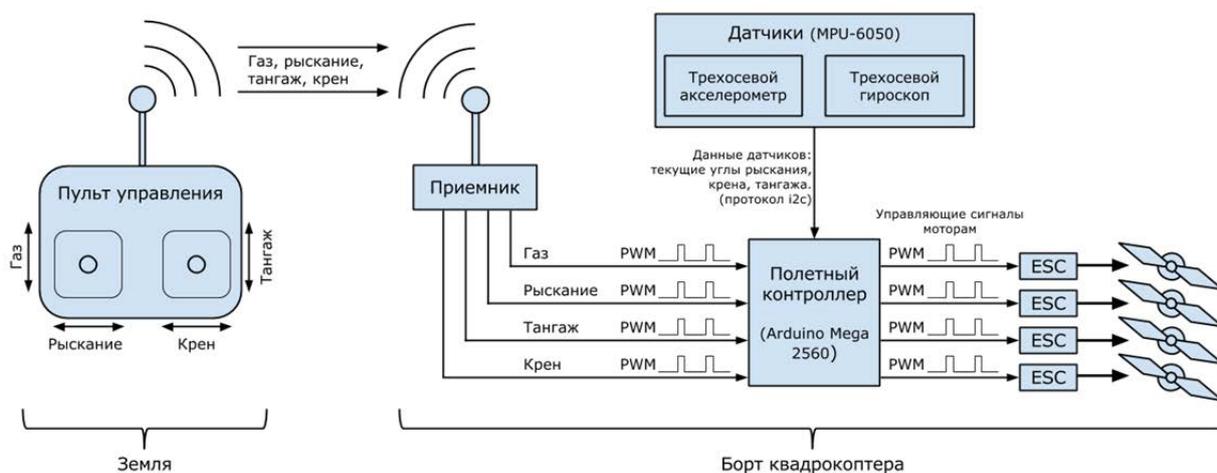


Рис. 1. Типовая схема управления беспилотным летательным аппаратом

Протокол связи между регулятором и непосредственно мотором не имеет значения, так как способов взаимодействия на него извне мы не имеем. Ключевую роль играет протокол общения между полетным контроллером и регулятором, так как на данном этапе происходит программное управление последним.

Самые распространенные типы регуляторов управляются сигналом прямоугольной формы с минимальным значением 0 В и максимальным в 3,5 В и имеют ШИМ или PWM модуляцию.

Для того чтобы передать мотору команду вращаться, необходимо передавать команды с интервалом 2 мс с логическим нулем, общей длительностью от десяти до двадцати миллисекунд. Чтобы остановить мотор, необходимо снизить длительность импульса до 1 мс. Соответственно, чтобы заставить мотор вращаться со средней скоростью, необходимо задать интервал в 1,5 мс, а если задать интервал в 1,7 мс, то мотор будет работать на 70 % мощности.

Длительность нуля не играет роли, важны параметры самого импульса. Мы рассмотрели идеальные условия и параметры управления. Фактически оборудование и комплектующие имеют свои погрешности, и на практике различие в 0,1 – нормальное явление. Отсюда следует то, что для калибровки данных значений проектируются определенные фильтры и защитные алгоритмы, которые в свою очередь имеют свои уязвимости.

По такому алгоритму взаимодействия работают практически все беспилотные летательные аппараты.

Теперь рассмотрим несколько примеров распространенных систем дистанционного управления летательным аппаратом и выделим основные различия между ними. Для наглядности возьмем бюджетный вариант, средний ценовой диапазон и профессиональное оборудование.

Станция управления в минимальном ценовом сегменте

Хорошим примером такой системы является пульт Futaba 6EX. Это 4-канальный пульт. Совместим с моделями БПЛА, такими как самолеты, малогабаритные вертолеты, предназначенные для начинающих пилотов. Такие системы имеют невысокую стоимость и доступны для массового потребителя [3, 4].

Основные характеристики:

- четыре канала связи;
- оснащен разъемом для подключения к всевозможным симуляторам (PPM);
- передатчик 3PM-FM;
- приемник R153F;
- помехозащищенный протокол DSSS;
- время отклика 3 мс, в среднем у аппаратур 20 мс;
- дальность действия 900 м по земле, более 1500 м по воздуху;
- 4096 точек на каждом канале;
- частота 2,4 ГГц.

Станция управления в среднем ценовом сегменте

Хорошим примером такой системы является пульт Futaba 14SG. Это 14-канальный пульт. Совместим с моделями БПЛА, такими как самолеты, малогабаритные вертолеты, предназначенные для опытных пилотов. Такие системы имеют невысокую стоимость и доступны для массового потребителя.

Основные характеристики:

- 14 каналов связи;
- оснащен разъемом для подключения к всевозможным симуляторам (PPM);
- передатчик T14SG;
- приемник R7008SB, он поддерживает последние технологии S.BUS2 и сервы High Voltage;
- помехозащищенный протокол DSSS;
- совместима с системами, использующими протоколы FASSTest, FASST и S-FHSS. Телеметрия FASSTest;
- время отклика 3 мс, в среднем у аппаратуры 20 мс;
- дальность действия не превышает 1500 м;
- 4096 точек на каждом канале;

- частота 2,4 ГГц;
- пульт также имеет универсальную «внутреннюю память». Она может хранить не только данные о моделях и настройках, но и использоваться для хранения файлов звуков и изображений.

Станция управления в высоком ценовом сегменте

Хорошим примером такой системы является пульт Futaba 18MG. Это 18-канальный пульт. Совместим с моделями БПЛА, такими как самолеты, малогабаритные вертолеты, предназначенные для профессиональных пилотов. Такие системы имеют высокую стоимость и недоступны для массового потребителя, но могут приобретаться подготовленными командами [5].

Основные характеристики:

- 18 каналов связи;
- оснащен разъемом для подключения к всевозможным симуляторам (PPM);
- передатчик Futaba 18MZ;
- приемник R7008SB, он поддерживает последние технологии S.BUS2 и сервы High Voltage;
- помехозащищенный протокол DSSS;
- система совместима с системами, использующими протоколы **FASSTest**, **FASST** и **S-FHSS**.

Телеметрия FASSTest;

- время отклика 3 мс, в среднем у аппаратуры 20 мс;
- дальность действия не превышает 1500 м;
- 4096 точек на каждом канале;
- частота 2,4 ГГц;
- может менять частоту сотню раз в секунду, что позволяет найти максимально подходящую для бесперебойного управления частоту;
- предупреждение ошибки. Система Fasst способна сканировать всю полученную информацию и самостоятельно исправлять всевозможные ошибки системы, обеспечивая тем самым надежную связь с моделью;
- поддерживает протоколы S-FHSS и FASST.

Как мы видим из примеров выше, приведенные системы отличаются в основном числом каналов, что позволяет управлять аппаратом с большим числом функциональных модулей и «обвесов», а также качеством защиты каналов связи. Все остальные параметры у них схожи, в том числе и протоколы связи.

Отсюда можно сделать вывод, что если получится составить список основных протоколов связи между станцией и БПЛА, а также выделить основные параметры сигнала и разработать способ противодействия, применимый к ним, то мы получим довольно универсальную систему противодействия гражданским беспилотным аппаратам.

Далее рассмотрим основные протоколы, на которых могут работать данные системы связи.

Основные протоколы связи в системах дистанционного управления

В большинстве моделей приемников используются одни и те же протоколы связи, а именно:

- PWM (универсальный);
- PPM (универсальный);
- PCM (универсальный);
- SBUS (Futaba, Frsky);
- IBUS (Flysky);
- XBUS (JR);
- MSP (Multiwii);
- SUMD (Graupner);
- SUMH (Graupner).

Среди них есть универсальные протоколы, а также запатентованные, защищенные протоколы от компаний производителей, точные характеристики которых отсутствуют в общем доступе и являются конфиденциальной информацией.

Протоколы, используемые в передатчиках, часто реализованы только одним брендом. Некоторые бренды позволяют использовать несколько протоколов, в зависимости от имеющихся у вас приемников, примеры:

- D8 (Frsky);
- D16 (Frsky);
- LR12 (Frsky);
- DSM (Spektrum);
- DSM2 (Spektrum);
- DSMX (Spektrum);
- Flysky;
- A-FHSS (Hitec);
- FASST (Futaba);
- Hi-Sky (Deviation).

Частотные диапазоны и параметры сигнала

Рассматривая ряд беспилотных аппаратов и систем управления, было выявлено, что наиболее распространенная частота в 2,4 ГГц, именно на этой частоте функционирует большинство систем. Как мы знаем, на этой же частоте работает и Wi-fi. Поэтому на рынке существует довольно много моделей беспилотных аппаратов, осуществляющих связь именно посредством данной технологии. Но ее применение имеет ряд минусов, а именно: небольшую дальность полета и довольно низкие показатели безопасности, что явно не может удовлетворять показателям качества во многих ситуациях применения беспилотных аппаратов [6].

Поэтому был проведен небольшой эксперимент, чтобы на практике проверить рабочие частоты системы.

В эксперименте участвовала система в минимальном ценовом диапазоне, а именно: станция управления HiTec Laser 4 (рис. 2) и беспилотный летательный аппарат самолетного типа с одним двигателем и аккумуляторной батареей 1500 мА.



Рис. 2. Система управления HiTec Laser 4

В лаборатории на кафедре Уральского федерального университета нами был измерен радиосигнал, излучаемый данной станцией, и выявлены основные рабочие частоты. На станции была установлена опция «автоматическое переключение частот», поэтому станция сама выбирала, в каком частотном диапазоне ей вести работу в зависимости от условий.

В эксперименте станция начала работать на частоте 72 МГц, в процессе, когда создавались различные преграды для прохождения сигнала, она автоматически переключалась на частоту 2,4 ГГц, и наконец, в идеальных условиях прохождения сигнала она продолжила свою работу на частоте 40 МГц, что продемонстрировано на рис. 3.

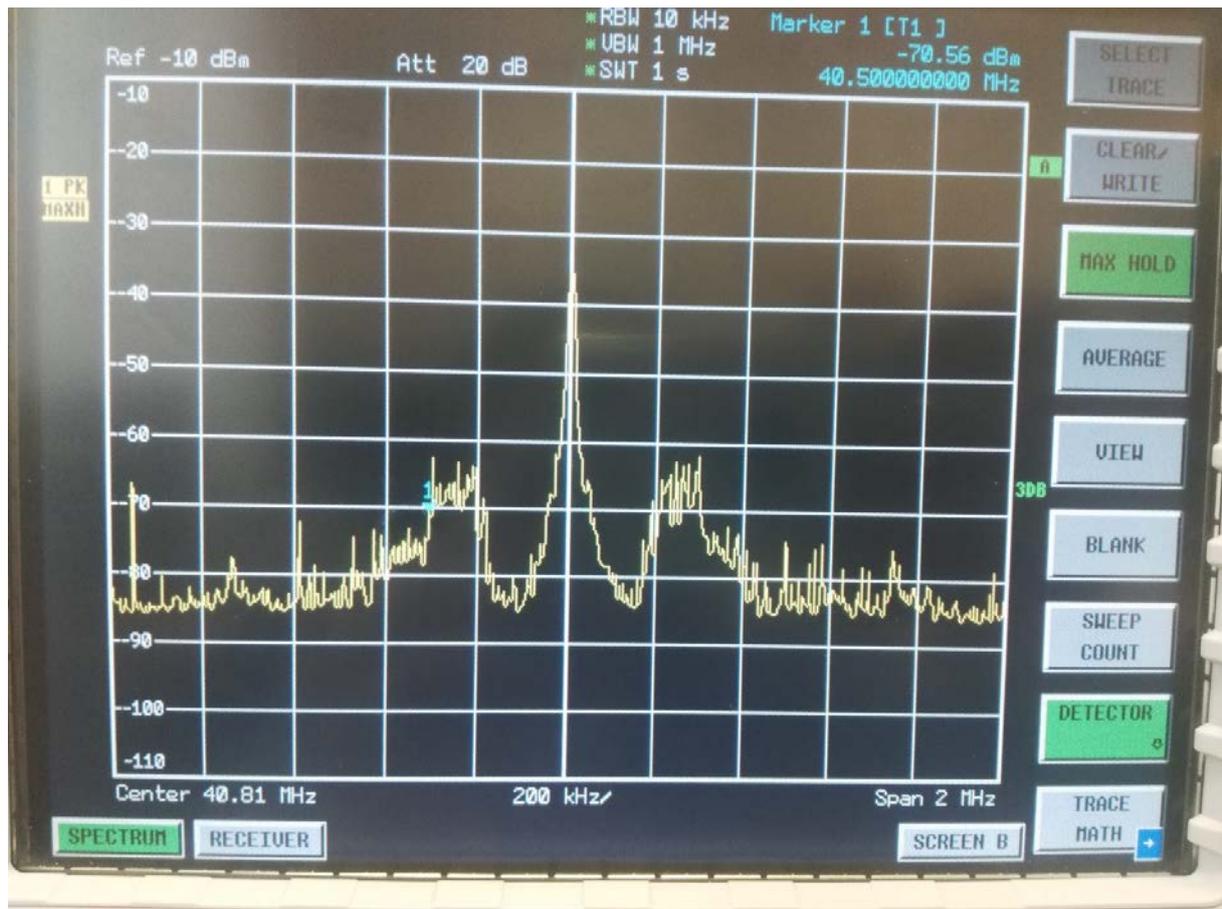


Рис. 3. Экспериментальные измерения рабочих частот

Как мы видим, полученный сигнал был в диапазоне частот от 40 до 42 МГц, имел затухание в районе 70 dBm [7, 8].

Работа именно в данных частотах позволяет беспилотным аппаратам взаимодействовать со станцией на довольно больших расстояниях. Частота 2,4 ГГц не позволит достичь данного результата.

Данный эксперимент не может считаться эталонным, однако позволяет выявить основные параметры сигнала при различных условиях и в дальнейшем позволит разработать систему радиопротиводействия основным типам БПЛА [9, 10].

Библиографический список

1. Тимоти, У. М. Малые беспилотные летательные аппараты: теория и практика / У. М. Тимоти, У. Б. Рэндал. – М. : Техносфера, 2016. – 312 с.
2. Тищенко, М. А. Вертолеты. Машиностроение / М. А. Тищенко, А. С. Некрасов. – М. : Машиностроение, 1976. 366 с.
3. Красильщикова, М. Н. Современные информационные технологии в задачах навигации и наведения беспилотных маневренных летательных аппаратов / М. Н. Красильщикова, Г. Г. Себрякова. – М. : Физматлит, 2009. – 556 с.
4. Беспилотnyj letatel'nyj apparat [Unmanned aerial vehicle]. – URL: <http://www.tadviser.ru/index.php> (date of access 12.11.2017). (In Russian)
5. Ким, Н. В. Групповое применение беспилотного летательного аппарата в задачах наблюдения / Н. В. Ким, И. Г. Крылов // Труды МАИ. – 2016. – № 62. – С. 63–68.
6. Соловьев, В. А. Управление космическими полетами / В. А. Соловьев, Л. Н. Лысенко, В. Е. Любинский ; под ред. Л. Н. Лысенко. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. – Т. 2. – 426 с.
7. Белов, Л. А. Устройства формирования СВЧ-сигналов и их компоненты / Л. А. Белов. – М. : Изд. дом МЭИ, 2010. – 320 с.
8. Гвоздев, В. И. Объемные интегральные схемы СВЧ / В. И. Гвоздев, В. И. Нефедов. – М. : Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1985. – 256 с.

9. Пименов, А. И. Механизмы управления в радиоаппаратуре / А. И. Пименов. – М. : Энергия, 1966. – 168 с.
10. Бойко, А. Привязные беспилотники / А. Бойко. – URL: <http://robotrends.ru/robopedia/privyaznye-bespilotniki> (дата обращения 28.11.2017).

References

1. Timoti U. M., Rendal U. B. *Malye bespilotnye letatelnye apparaty: teoriya i praktika* [Small unmanned aerial vehicles: theory and practice]. Moscow: Tehnosfera, 2016, 312 p.
2. Tishhenko M. A., Nekrasov A. S. *Vertolety. Mashinostroenie* [Helicopters. Mechanical engineering]. Moscow: Mashinostroenie, 1976, 312 p.
3. Krasilshhikova M. N., Sebyakova G. G. *Sovremennye informacionnye tehnologii v zadachah navigacii i navedeniya bespilotnyh manevrennykh letatelnykh apparatov* [Modern information technologies in the tasks of navigation and guidance of unmanned maneuverable aircraft]. Moscow: Fizmatlit, 2009, 556 p.
4. *Bespilotnyj letatel'nyj apparat* [Unmanned aerial vehicle]. Available at: <http://www.tadviser.ru/index.php> (accessed Nov. 12, 2017).
5. Kim N. V., Krylov I. G. *Trudy MAI* [Proc. of the MAI]. 2016, no. 62.
6. Solov'ev V. A., Lysenko L. N., Lyubinskiy V. E. *Upravlenie kosmicheskimi poletami* [Space flight control]. Moscow: Izd-vo MGTU im. N. E. Baumana, 2010, vol. 2, 426 p.
7. Belov L. A. *Ustrojstva formirovaniya SVCh-signalov i ih komponenty* [Devices for the formation of microwave signals and their components]. Moscow: Izdatel'skij dom MEI, 2010.
8. Gvozdev V. I., Nefedov V. I. *Obemnye integralnye shemy SVCh* [Volumetric integrated circuits of microwave]. Moscow: Nauka. Glavnaja redakcija fiziko-matematicheskoy literatury, 1985, 256 p.
9. Pimenov A. I. *Mehanizmy upravleniya v radioapparature* [Control mechanisms in radio equipment]. Moscow: Energiya, 1985, 168 p.
10. Bojko A. *Privyaznye bespilotniki* [Docked UAVs]. Available at: <http://robotrends.ru/robopedia/privyaznye-bespilotniki> (accessed Nov. 28, 2017).

Семенец Вячеслав Олегович

аспирант,
Уральский институт связи и информатики
(620109, Россия, г. Екатеринбург, ул. Репина, 15)
E-mail: sublane@mail.ru

Трухин Михаил Павлович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра общепрофессиональных дисциплин
технических специальностей,
Уральский институт связи и информатики
(620109, Россия, г. Екатеринбург, ул. Репина, 15)
E-mail: mptru@mail.ru

Semenets Vyacheslav Olegovich

postgraduate student,
Ural Institute of Communications and Informatics
(620109, 15 Repin street, Ekaterinburg, Russia)

Trukhin Mikhail Pavlovich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of general professional disciplines
of technical specialties,
Ural Institute of Communications and Informatics
(620109, 15 Repin street, Ekaterinburg, Russia)

УДК 681.513.3

Семенец, В. О.

Основные параметры систем управления беспилотными аппаратами / В. О. Семенец, М. П. Трухин // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 3 (23). – С. 65–70. – DOI 10.21685/2307-4205-2018-3-9.

А. И. Канащенко, С. В. Новиков

ОСНОВНЫЕ МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

A. I. Kanashchenkov, S. V. Novikov

BASIC METHODOLOGICAL PRINCIPLES OF DESIGNING A NEW GENERATION OF AIRCRAFT RADAR SYSTEMS

Аннотация. *Актуальность и цели.* Требования снижения затрат при все возрастающей сложности и объемах выполняемых задач предвещают переход к аппаратно- и функционально интегрированным радиолокационным системам летательных аппаратов (РСЛА) нового поколения, в которых комплексирование осуществляется не по физическим принципам работы первичных измерителей, а по функциональному назначению систем. Для проектирования радиолокационных систем нового поколения требуется изменение принципов конструирования, которые бы обеспечили переход от технологий конструирования поколения «4» к новым технологиям конструирования этих систем нового поколения «4++», «5», т.е. необходимо перейти от технологии конструирования «снизу-вверх» к технологии конструирования «сверху-вниз». *Материалы и методы.* Предложена структура взаимосвязи факторов технического и экономического характера, которые необходимо учитывать при создании РСЛА. Предложены разные методы решения этой задачи с тем, чтобы обеспечить качество информационного обеспечения и сокращение стоимости жизненного цикла. Предложены ключевые методологические принципы, обеспечивающие реализацию требований, установленных к радиолокационным системам нового поколения. Предложены способы реализации метода разработки технологии на основе обеспечения единства стадий: научных исследований, конструирования, разработки технологии и организации производства как единого процесса создания систем. *Результаты.* Реализация на практике при создании радиолокационных систем нового поколения «4++» (например, Ka-диапазона) основных методологических принципов и методов конструкции, снижение массогабаритных характеристик РЛС нового поколения по сравнению с существующими аналогами в 2,5 раза, повышение надежности почти в 2,5–3 раза, сокращение стоимости жизненного цикла более чем в 2 раза и другие преимущества. *Выводы.* Предложены эффективные методы и принципы конструирования аппаратуры во взаимосвязи с техническими, экономическими и тактическими характеристиками,

Abstract. Background. Requirements to reduce costs with increasing complexity and volume of tasks will predetermine the transition to hardware and functionally integrated radar systems of aircraft (RLA) of the new generation, in which the integration is carried out not according to the physical principles of the primary meters, but according to the functional purpose of the systems. To design a new generation of radar systems requires a change in design principles that would ensure the transition from the design technology generation "4" to new technologies for the construction of these systems of the new generation "4++", "5", i.e. it is necessary to move from the design technology "bottom-up" to the design technology "top-down". *Materials and methods.* The structure of interrelation of factors of technical and economic character which need to be considered at creation of RLA is offered. Different methods of solving this problem in order to ensure the quality of information support and reduce the cost of the life cycle are proposed. The key methodological principles that ensure the implementation of the requirements established for a new generation of radar systems are proposed. Methods of realization of a method of development of technology on the basis of ensuring "unity of stages are offered: scientific researches, designing, development of technology and the organization of production" as uniform process of creation of systems. *Results.* Implementation of the basic methodological principles and methods of construction, reduction of weight and size characteristics of the new generation radar compared to existing analogues by 2.5 times, increasing reliability by almost 2.5–3 times, reducing the life cycle cost by more than 2 times and other advantages in practice when creating a new generation radar systems "4++" (for example, Ka-band). *Conclusions.* The effective methods and principles of equipment design in connection with technical, economic and tactical characteristics, which provide the creation of a new generation of radar systems, not inferior to the requirements of the international class, are proposed.

которые обеспечивают создание радиолокационных систем нового поколения, не уступающих требованиям международного класса.

Ключевые слова: авиационная радиолокация, радионавигация, радиотехническое оборудование, проектирование высокотехнологичной техники, инновационное производство.

Key words: aviation radar, radio navigation, radio equipment, design of high-tech equipment, innovative production.

Введение

Спецификой современного состояния авиации является то, что существенно возросли возможности самолетов-носителей по изменению своего углового и пространственных положений, расширилось поле значений и законов изменения скоростей и ускорений перемещений, качественным образом изменились возможности авиационных средств поражения. В то же время происходящее бурное развитие прикладных сторон фундаментальных наук, возрастающая способность датчиков различной физической природы извлекать из геофизических полей все больший объем информации и все возрастающие возможности вычислительных систем по объему памяти и быстродействию, применение новых технологий позволяют все полнее удовлетворять требованиям информационного обеспечения все усложняющихся видов и способов боевых действий. В то же время реализация этих возможностей требует значительных объемов финансовых ресурсов, материальных, людских и временных затрат. Поэтому при формировании облика радиолокационных систем перспективных самолетов требуется не только количественное улучшение показателей эффективности, но и принятие **новых конструктивных решений** [1]. В связи с этим требуется выделить ряд принципиальных направлений, определяющих облик РСЛА (рис. 1).



Рис. 1. Основные направления, определяющие облик РСЛА

Если технические, экономические, технологические факторы носят в основном объективный характер, то организационные во многом определяются субъективными качествами Заказчика и Исполнителя [1].

Взаимосвязь этих факторов представлена на рис. 2.

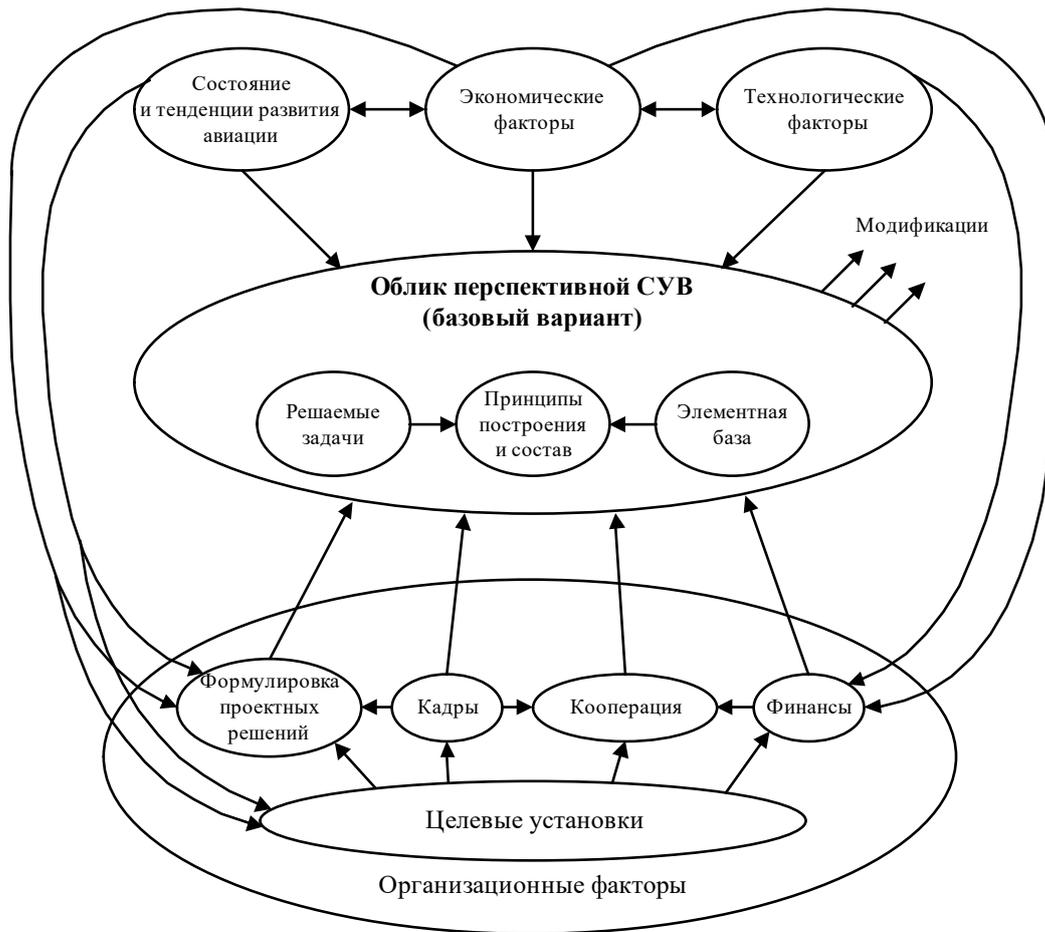


Рис. 2. Взаимосвязь факторов, учитывающихся при разработке РСЛА

Задачу удовлетворения этих требований по повышению качества информационного обеспечения и сокращению стоимости жизненного цикла разрабатываемых РСЛА можно решать разными способами [2].

Во-первых, не исчерпал еще возможностей путь эволюционного развития, в рамках которого можно улучшать показатели эффективности традиционным методом. Однако нужно учесть, что в эксплуатации находятся в большей степени радиолокационные системы поколения «четыре», и в этом поколении систем не удалось решить ряд проблем, имевших место ранее, так, например, точность решения боевых задач практически осталась на уровне поколения «три». Практически на том же уровне остались показатели надежности. Стоимость жизненного цикла остается высокой. Структура систем четвертого поколения не является рациональной, так как при конструировании аппаратуры применен метод, не оправдавший себя еще в первом поколении, связанный с искусственным делением на подсистемы по физическому принципу действия, а не по решаемым задачам. В четвертом поколении еще по-прежнему сохранен принцип конструирования с использованием системы «снизу-вверх».

В настоящее время научно-технический прогресс в области авиации решает задачи создания систем пятого поколения. Это связано с новыми тенденциями развития авиации, непосредственно или опосредовано влияющими на облик РСЛА. Характерным для этого поколения является создание интегрированных РСЛА на основе принципа проектирования «сверху-вниз».

Таким образом, с учетом вышеизложенного необходимо определить основные методологические принципы проектирования радиолокационных систем пятого поколения с учетом факторов развития авиации, обеспечивая при этом высокую надежность, повышение уровня тактико-технических характеристик, обеспечивая высокую контролепригодность и резкое сокращение стоимости жизненного цикла проектируемых радиолокационных систем нового поколения.

Этапы решения задачи выбора структуры авиационной РСЛА

Современные РСЛА являются физическими комплексами иерархически построенных информационно-управляющих систем. В общем случае РСЛА представляет собой одну из наиболее динамично развивающихся разновидностей бортовых информационных управляющих систем с широкой сетью режимов работы [1–4]. Проектирование таких систем является чрезвычайно сложной задачей, при решении которой необходимо учитывать комплекс взаимосвязанных тактических, экономических и технологических факторов, влияющих на облик перспективной РСЛА, рассмотренных в работе [1], а также в предисловии настоящей статьи.

РСЛА многофункционального самолета представляет совокупность функционально связанных подсистем. Именно совокупность технических и алгоритмических средств получения информации о необходимых фазовых координатах и определяет аппаратный состав РСЛА. Из этого следует, что число возможных вариантов построения структуры РСЛА, которые обладают возможностями, исходя из уровня функциональной интеграции, и определяют уровень аппаратной интеграции, исключая при этом, по возможности, аппаратную избыточность и обеспечивая наилучшие возможности с точки зрения эффективности в заданном множестве условий боевого применения или решения других задач самолета.

Синтез РСЛА начинается с формулирования задач, возлагаемых на нее, требований, предъявляемых к ней, описания свойств внешней среды, в которой она должна функционировать, и определения располагаемых вычислительных ресурсов.

Экономические факторы, влияющие на облик радиолокационных систем

Огромные затраты на войны с использованием современного дорогостоящего оружия требуют от специалистов обратить пристальное внимание на экономическую сторону и принять меры к снижению затрат. Оценка уровней материальных, трудовых и финансовых ресурсов, затрачиваемых на создание информационных систем (ИС) нового поколения, будем проводить как для боевых действий (БД), так и для процессов разработки новых типовых ИС, поддержки их функционирования, а также затрат на эксплуатацию (обслуживание) информационных систем. Актуальность учета экономичности ведения БД обусловлена тремя факторами, графически представленными на рис. 3.

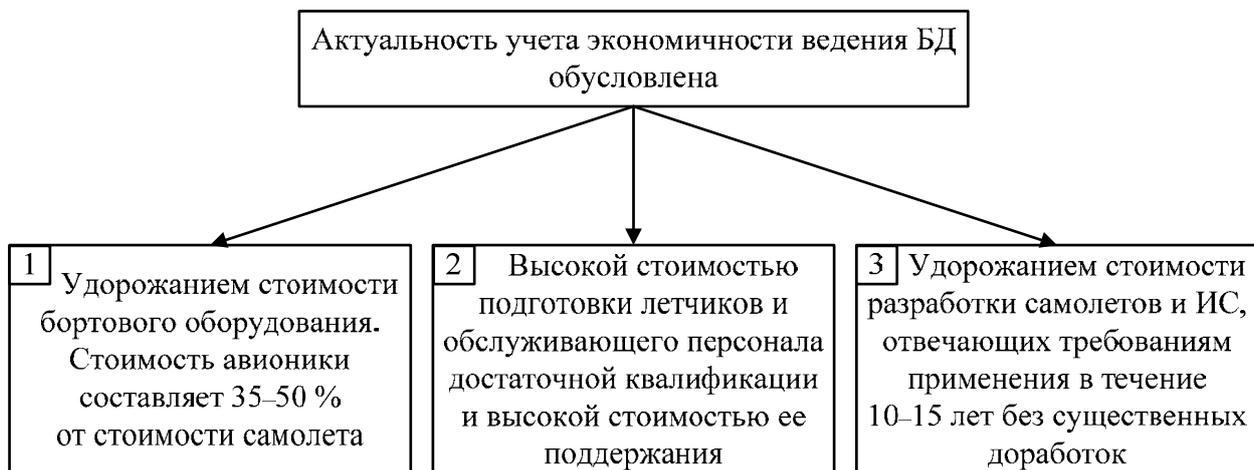


Рис. 3. Факторы, требующие учета экономичности ведения БД

Учет этих факторов определяется следующими основными направлениями развития авиации и ИС: многофункциональность применения, внедрение экономичных боевых режимов, снижение потерь и нерационального расхода топлива и средств поражения, снижение требований к уровню подготовки летчиков и обслуживающего персонала, снижение стоимости жизненного цикла, функциональная и аппаратная интеграция и т.д. Функциональные связи представлены на рис. 4.



Рис. 4. Экономические факторы, влияющие на формирование облика РСЛА

Из всего перечня этих направлений необходимо учесть при формировании облика радиолокационных систем управления оружием те, которые непосредственно влияют на облик.

Проектирование радиолокационных систем управления оружием

Несколько лет назад встала задача, как перейти на радиолокационные системы управления оружием нового поколения, так как в большинстве случаев на эксплуатации находятся системы поколения «4», по существу имеющие те же недостатки, что и аппаратура поколения «3».

Потребность в радарх нового поколения объясняется не только заменой устаревших моделей и возможностью тем самым повысить боевую эффективность существующих летательных аппаратов, например, вертолетов, но и необходимостью оборудования радиолокационными системами летательных аппаратов (самолетов, вертолетов и БЛА) нового поколения.

В процессе исследований были сформированы принципы создания нового поколения радиолокационных систем, которые обеспечили переход от технологий конструирования поколения «4» к технологии конструирования этих систем нового поколения («4++», «5»), т.е. от технологии конструирования «снизу-вверх» к технологии «сверху-вниз», с одной стороны, базирующейся на открытой архитектуре и высоком уровне цифровизации, функциональной и аппаратной интеграции бортового оборудования и т.д., и с другой – на создании функциональной сложной технологической системы на основе базовости конструкции и внутривидовой и межвидовой унификации. Развитие радиолокационных систем например, для вертолетов, приводит к тому, что нельзя для каждого летательного аппарата разрабатывать свой радиолокатор. Это требует больших начальных затрат на разработку технической системы и будет относительно высока стоимость серийных образцов, и в целом высокая стоимость жизненного цикла.

Ключевую роль, по нашему мнению, в этом играют прежде всего «Основополагающие принципы» создания новых технических систем (рис. 5).

Реализация на практике этих принципов позволяет, прежде всего [5]:

- при росте технических характеристик, повышении функциональной сложности создаваемых технических систем снизить относительную стоимость этих систем и обеспечить ее приемлемость при минимальном риске;

- повысить адаптивность радиолокационной системы к различным летательным аппаратам с учетом возможности модификации их к различным летательным аппаратам;

- внести определенность в применении новых технологий для улучшения экологических показателей;
- улучшить возможности наращивания тактико-технических характеристик на жизненном цикле технических систем;
- обеспечить более высокие показатели надежности, низкую стоимость эксплуатации и т.д.



Рис. 5. Основополагающие принципы создания новых технических (радиолокационных) систем

Для реализации этих принципов и обеспечения развития принципов конструирования технических систем «сверху-вниз» разработаны и внедрены единые «Основные методологические принципы конструирования технических систем» (рис. 6), опирающиеся на базовые «Основополагающие принципы», реализуемые с использованием открытости архитектуры, модульности построения, функциональной и аппаратной интеграции, цифровизации, стандартных внутренних и внешних интерфейсов, высокой надежности и экономичности эксплуатации и т.д.

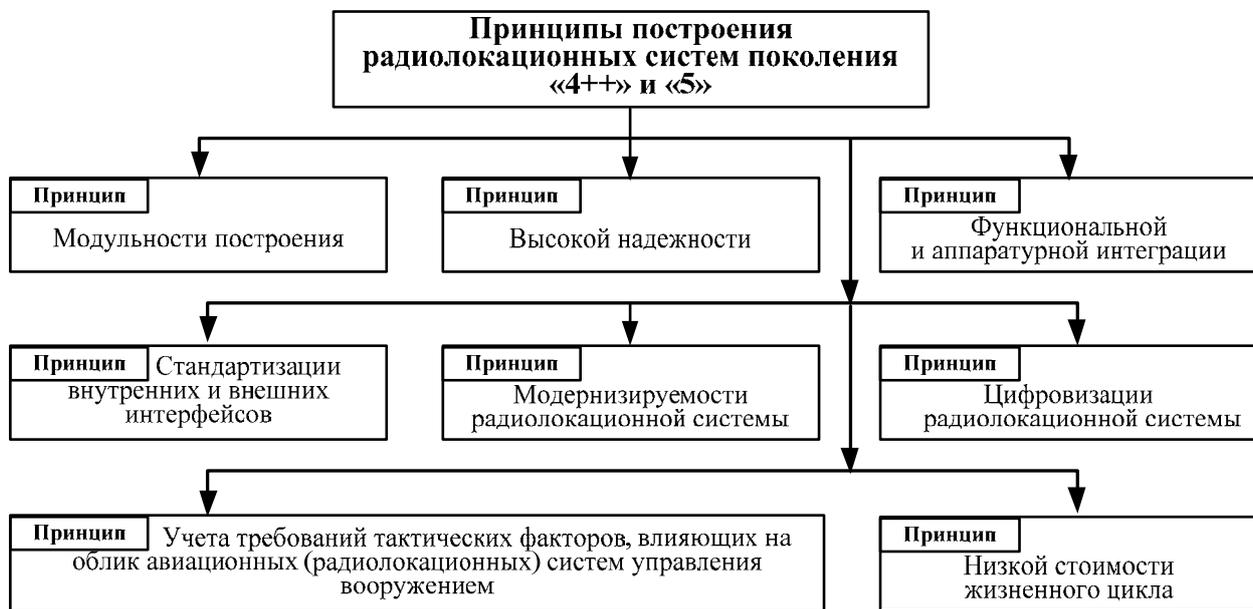


Рис. 6. Основные методологические принципы построения технических систем нового поколения

Используя эти принципы, в Московском авиационном институте создано унифицированное семейство радиолокационных систем, предназначенных для использования в летательных аппаратах типа вертолет, учебно-боевой самолет, беспилотный летательный аппарат (БЛА). Пример: радиолокационная система Ка-диапазона волн разработана и прошла испытания. Имеет литеру «О», разработана с использованием «основных методологических принципов» конструирования (рис. 7) [7].

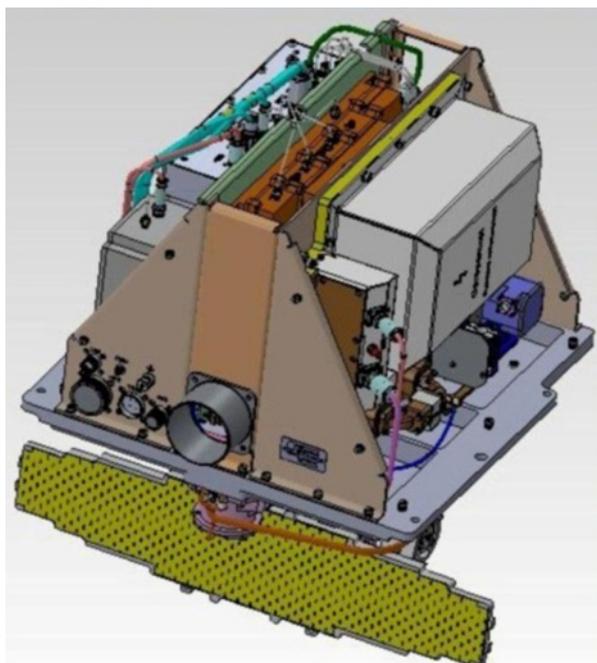


Рис. 7. Малогабаритная масштабируемая многорежимная радиолокационная система нового поколения с щелевой антенной решеткой Ka-диапазона волн

Конструкция разработана с использованием предложенных методологических принципов построения.

МБРЛС Ku-диапазона волн:

- АМ-1 – электрический привод с ЩАР;
- ПЗМ1 с ПРМ1 – модуль приемо-задающий, цифровизированный, аппаратно и функционально интегрированный, выполняющий функции: опорного генератора, синхронизатора, формирователя импульсов, синтезатора и преобразователя сигналов;
- ПРД1 – твердотельный передающий модуль Ka-диапазона волн;
- БЦВМ-С – БЦВМ нового поколения со встроенным цифровым приемником.

Сравнительные конструктивные характеристики радиолокационной системы поколения «4», находящейся в эксплуатации, и нового поколения «4++» с использованием предлагаемых «Основных методологических принципов конструирования», приведены в табл. 1. Используются унифицированные радиолокационные модули [8].

Таблица 1

Сравнительные характеристики радиолокационных систем разных поколений

Наименование параметров	БРЛС поколения «4», находящиеся в эксплуатации	Изделия нового поколения, разработанные с использованием основополагающих принципов конструирования
1. Вес аппаратуры, кг	140	35
2. Количество блоков (модулей)	более 12	4
3. Надежность аппаратуры, часов на отказ	150 (не достигнута)	350
4. Стоимость жизненного цикла	X	в 2,5 раза ниже
5. Стоимость серийного образца	X	в 2,4 раза ниже
6. Функциональные возможности		Улучшены: дальность в 1,3 раза, разрешающая способность – в 3 раза, введены новые режимы и т.д.
7. Занимаемый объем на объекте	~1 от выделенного на объекте	0,28 от выделенного на объекте
8. Потребляемая мощность, Вт	свыше 1000,0	400,0

Опережающее развитие технологий и оптимальные взаимосвязи их с конструированием технических систем

При конструировании технических систем важно реагировать на запросы рынка (потребности) и реагировать на изменение технических возможностей систем. Каждое исследование, создание новых технических систем требует не только реализации новых методологических принципов конструирования, но и новых принципов организации технологии. Представляется, что эти принципы основаны на единстве процессов **конструкции, компонентов, технологии и оптимизации конструкторско-технологических характеристик (КТХ) и производства**. Средой для выполнения этих условий могут быть опережающая технология и высококачественное технологическое оборудование (рис. 8).

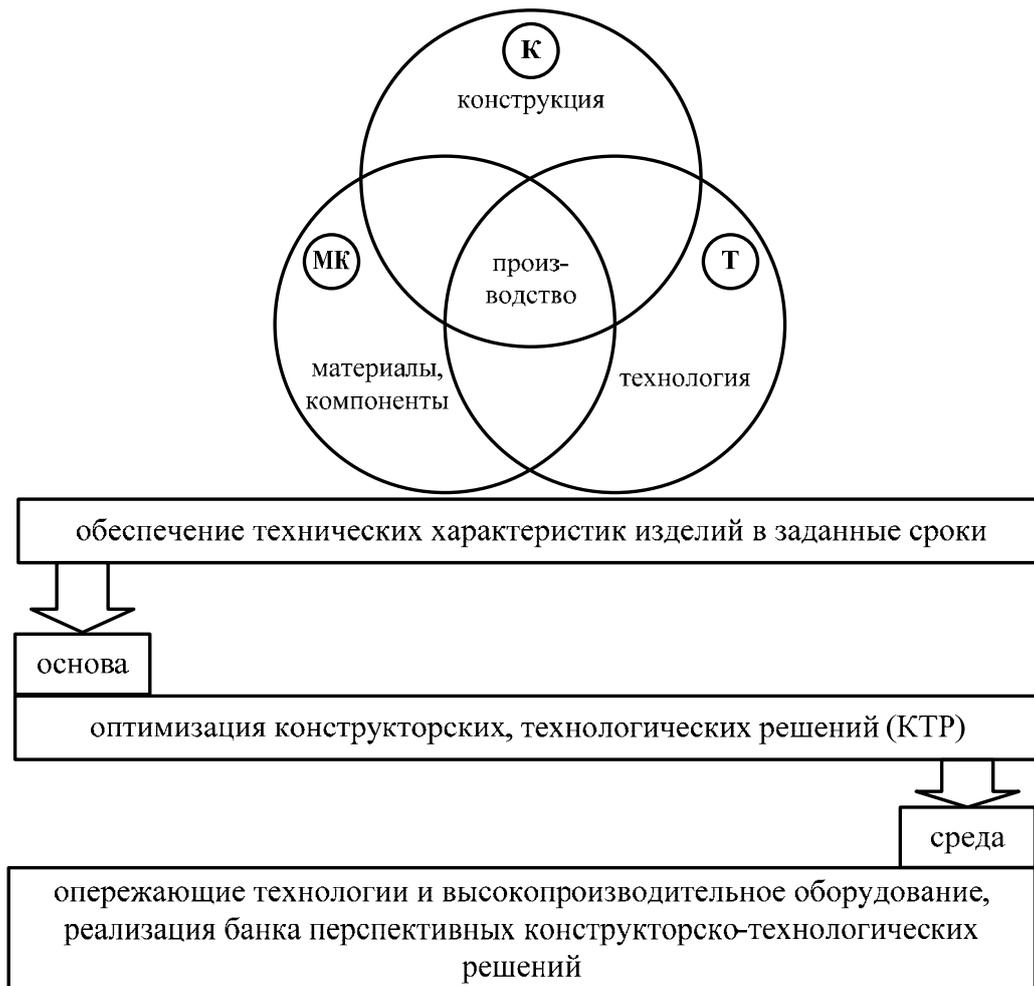


Рис. 8. Схема разработки изделий на основе оптимизации и опережающей технологии

Как видно из рис. 8, производство – это система операционного превращения материалов и компонентов посредством технологий в заданную конструкцию. Обеспечение технических характеристик изделия в заданные сроки осуществляется на основе оптимизации конструкторско-технологических решений (КТР). Условие обеспечения заданных технических характеристик в установленные сроки сходно производственной среде, в которой имеются современные опережающие технологии, высокопроизводительное оборудование и банк данных конструкторско-технологических решений. Общесистемные принципы конструирования сложных технических систем, изложенные выше, предполагают оптимизацию конструкторско-технологических решений, на основе этого создается банк унифицированных прогрессивных конструкторско-технологических решений [9].

Технология создания сложных технических систем представлена на рис. 9.



Рис. 9. Укрупненная технология создания сложных технических систем

Используя общесистемные принципы конструирования и принципы единства процессов создания конструкции, компонентов, технологии и оптимизации КТР в условиях обеспечения преемственности фундаментальных и прикладных исследований, единства создания конструкции, материалов и компонентов (с учетом более прогрессивных КТР) и моделирования внутренних и внешних процессов, создаются сложные технические системы. В процессе создания технической системы происходит выбор и разработка компонентов, обоснование технических характеристик и решений, выбор технологий и производственной базы, и проводятся последующие этапы создания технической системы, руководствуясь утвержденными ГОСТами. Результат можно наглядно представить в виде следующей схемы (рис. 10).

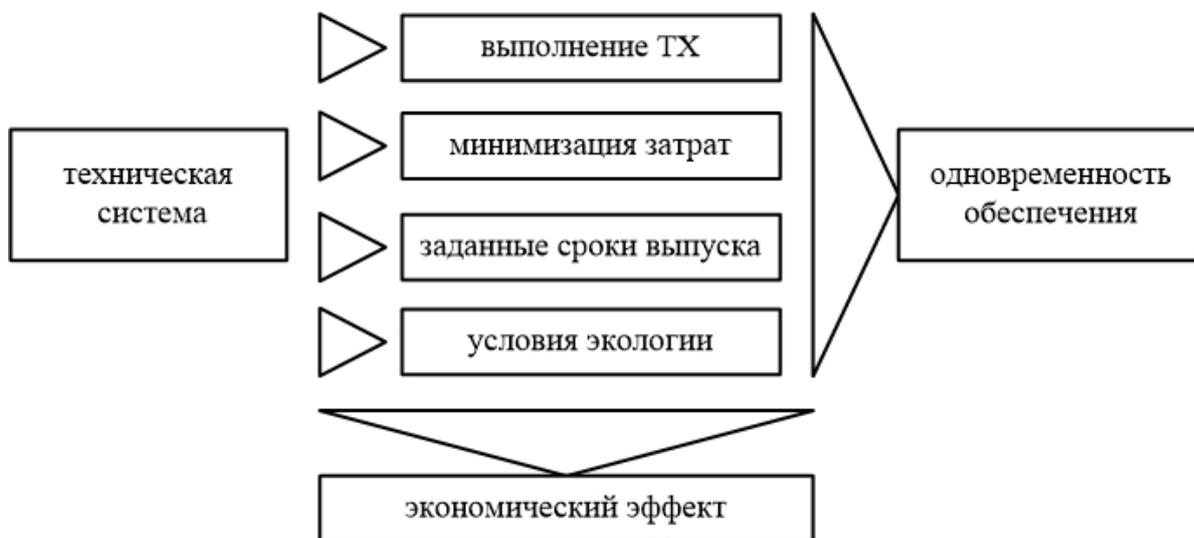


Рис. 10. Техническая система

Принципы создания новой технологии базируются на единстве процесса стадий разработки конструкции изделия, организации применения технологии и подготовки серийного производства приведены на рис. 11.



Рис. 11. Принципы технологического обеспечения производства

Суть новизны этих принципов заключается в системном и комплексном подходе проведения НИОКР, разработке технологии, подготовке и организации серийного производства как единого процесса, обеспечивающего высокий технологический уровень разработки, ТХ, подготовки и организации производства в сроки одновременно (или почти одновременно) с окончанием испытаний изделия при минимизации затрат на подготовку производства и серийный выпуск единицы изделия. По ранее существующей технологии после окончания испытаний и корректировки конструкторской документации начинается процесс подготовки серийного производства, который в зависимости от сложности длится 1–2 года. Новая технология позволяет сократить это время, что очень важно не только с позиции экономии средств, времени и труда, но и для обеспечения передовых позиций на новых рынках или расширения уже существующих сегментов рынка. Во-вторых, при применении такой технологии изделие имеет более высокие технико-экономические характеристики, качество, надежность и сокращение затрат на эксплуатацию [10].

Как видно на рис. 11, уже на стадии НИР, когда определяются технические характеристики разрабатываемого изделия, выявляются основные конструкторско-технологические решения. На стадии разработки технических предложений, которая предшествует эскизно-техническому проектированию, определяется массив основных КТР, формируются НИОКР в области технологии, закладываются основы обеспечения технологичности разрабатываемого изделия и затем уже на этой основе начинается технологическая подготовка.

Стадия эскизно-технического проектирования характеризуется, кроме обычных требований, связанных с разработкой конструкции, формированием НИОКР в области технологии, разработкой директивной технологической документации, обязательной для стадии рабочего проектирования, и совершенствованием технологической подготовки производства к выпуску изделия.

На следующей стадии заканчиваются разработка конструкторской документации (КД), обработка технологичности конструкции и продолжается технологическая подготовка производства.

Стадия испытаний подтверждает качество КД, при необходимости ее уточняет. На этой стадии заканчиваются разработка технической документации и подготовка серийного производства.

Базируясь на принципах единства процесса стадий разработки конструкции изделия, организации разработки технологии и подготовки серийного производства, разработана и представлена типовая модель технического обеспечения проектирования изделия на этой основе (рис. 12).

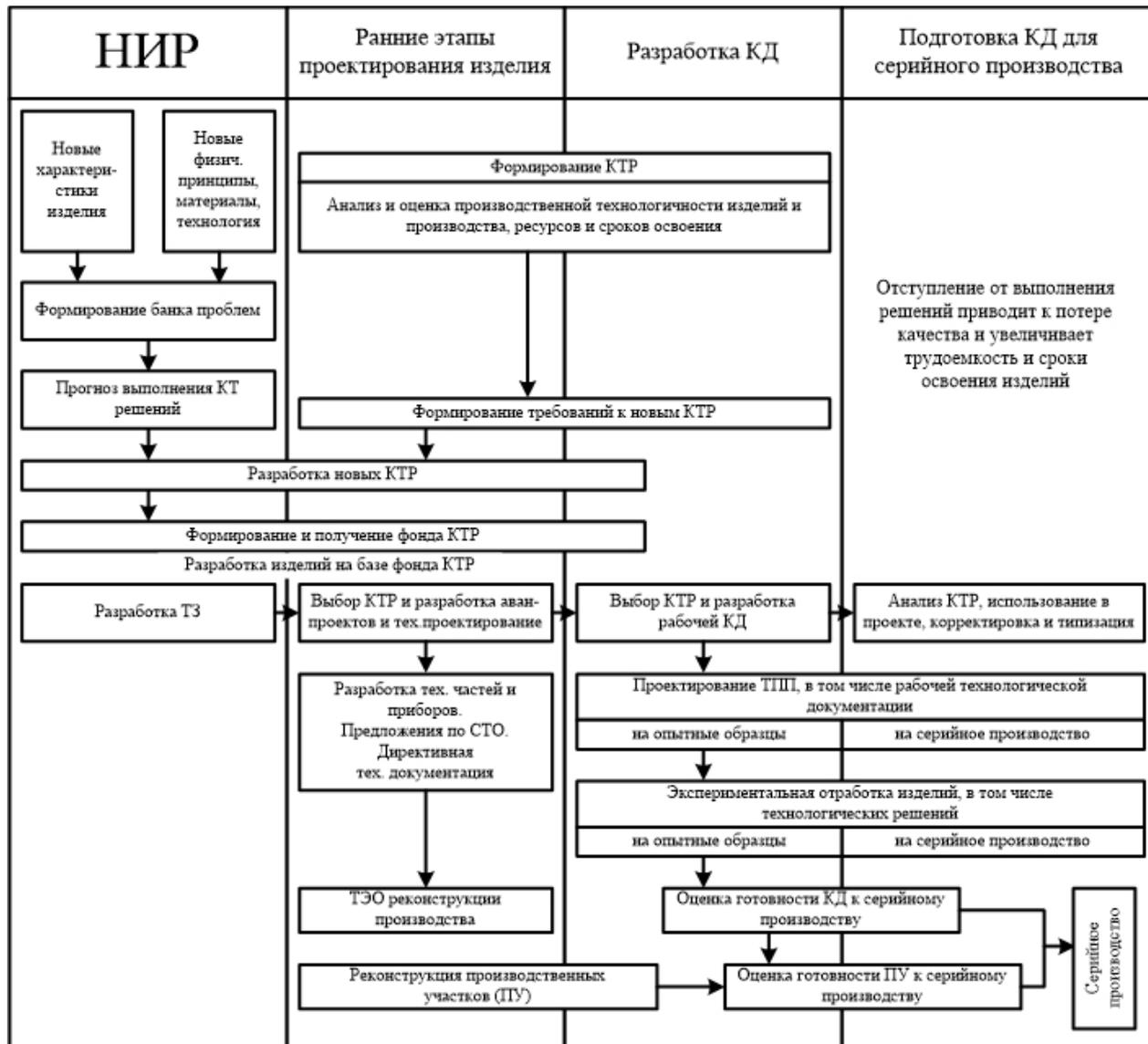


Рис. 12. Модель (типовая) технического обеспечения проектирования изделия

Каждый этап модели технического обеспечения проектирования имеет свои особенности, но все они взаимосвязаны между собой и в совокупности соответствуют принципу единства процесса стадий разработки конструкции, технологической разработки и подготовки серийного производства.

В соответствии с этой моделью на стадии НИР разрабатываются новые характеристики изделия с одновременно сформированным пакетом новых физических принципов, материалов, компонентов и базовых технологий. Это ложится в основу формирования банка проблем и формируется прогноз выполнения КТР. Уже на этой стадии начинается разработка новых КТР, формирование и получение фонда КТР. Фонд КТР – основа для разработки изделия и прежде всего на стадии НИР разработки технического задания.

Как видно, в процессе разработки изделия конструкторской документации в полном объеме пока еще нет, но уже на основе выработанных технологических решений начинается формирование пакета программ по реконструкции производства и участков, что очень важно для ускорения темпов создания изделия и его серийного производства.

На этапе разработки КД продолжается и заканчивается формирование КТР, их анализ и оценка производственной технологичности изделий и производства, анализируются ресурсы и сроки

освоения изделия в производстве. Продолжается и заканчивается формирование требований к новым КТР, разработка новых КТР и формирование их фонда. Важно, что на этом этапе осуществляется окончательный выбор КТР и заканчивается разработка конструкторской документации. На этой стадии проектируется технологическая подготовка производства, в том числе рабочей технической документации, производится экспериментальная отработка изделий, включая технологические решения, изготавливаются опытные образцы, оценивается готовность конструкторской документации к серийному производству, а также готовность производственных участков к серийному производству.

Этап испытаний изделия совмещен с окончанием подготовки конструкторской документации для серийного производства и осуществлением запуска установочной партии серийного производства. Необходимо всегда помнить, что отступление от выполнения тех или иных этапов работ приводит не только к потере качества, но и увеличивает трудоемкость и сроки освоения изделий.

Эти важные особенности ускорения продвижения продукта на рынок на основе новых принципов создания продукта одновременно с разработкой методов адаптации изделия к организационно-техническим условиям производства позволяют обеспечить высокий уровень качества изделий, конкурентоспособность на рынке при минимизации затрат на всех стадиях разработки, производства и эксплуатации [11].

Заключение

Использование общесистемных и методологических принципов конструирования аппаратуры и применение организационных принципов конструирования на основе «единства процесса создания конструкции, компонентов, технологии и организации производства» позволили при разработке трех радиолокационных систем обеспечить:

1) высокую степень аппаратной и функциональной интеграции, позволивших сократить количество модулей в МБРЛС до 3–4 (в существующих аналогах БРЛС – 13 блоков). Существенно сократить количество различных соединений и кабелей и уменьшить вес кабельной системы с ~ 20–25 кг в существующих системах до 1,5–2 кг в новых разрабатываемых системах;

2) высокий уровень стандартизации внутренних и внешних интерфейсов, позволяющих легкую адаптацию МБРЛС к различному типу летательных аппаратов, а стандартные внутренние интерфейсы обеспечивают модернизируемость МБРЛС в процессе жизненного цикла;

3) высокий уровень цифровизации с одновременно аппаратной и функциональной интеграцией в радиолокационной системе, что позволило резко сократить массогабаритные характеристики аппаратуры, снизить, например, вес МБРЛС «Ка» диапазона волн до 32 кг, вместо существующей БРЛС этого диапазона – 140 кг, существенно снизить (в три раза) энергопотребление, а следовательно, и выделение тепла, аппаратно и функционально интегрировать аппаратуру и создать унифицированные базовые радиолокационные модули для диапазона Ка, Ку, Х, которые имеется возможность применять в БРЛС для любого носителя, адаптируя лишь антенную систему к летательному аппарату (тип антенны – по требованию Заказчика);

4) повышение надежности в 2,5 раза по сравнению с существующими БРЛС, находящимися в эксплуатации, и надежность не менее 300–350 ч на отказ;

5) высокий уровень автоматизированного контроля, позволивший резко сократить количество стендовой аппаратуры, необходимой для эксплуатации;

6) повышение точности определения координат цели в 2,5–3 раза, а также других тактико-технических характеристик.

Проведенные мероприятия по созданию опытных образцов МБРЛС нового поколения позволят существенно сократить стоимость аппаратуры по сравнению с существующими аналогами, а также стоимость жизненного цикла.

Библиографический список

1. *Канащенков, А. И.* Формирование облика авиационных систем управления вооружением / А. И. Канащенков. – М. : Радиотехника, 2006.
2. *Канащенков, А. И.* Теория и практика управления современными организационно-экономическими системами (на опыте российских предприятий) / А. И. Канащенков. – М. : Блок-информ-экспресс, 2000.
3. *Антипов, В. Н.* Многофункциональные радиолокационные комплексы истребителей / В. Н. Антипов, С. А. Исаев, А. А. Лавров, В. И. Меркулов. – М. : Воениздат, 1994.

4. *Балуев, В. Н.* Авиационные прицельные системы / В. Н. Балуев, А. К. Ганулич, В. М. Герасимов, А. И. Козменко. – М. : ВВИА им. Н. Е. Жуковского, 1986.
5. *Меркулов, В. И.* Авиационные системы радиуправления. Т. 1. Принципы построения систем радиуправления. Основы синтеза и анализ / под ред. А. И. Канащенкова, В. И. Меркулова. – М. : Радиотехника, 2003.
6. *Канащенков, А. И.* Малогабаритная многорежимная бортовая радиолокационная система КУ-диапазона волн / А. И. Канащенков, А. М. Матвеев, С. В. Новиков, Д. С. Красавин // *Электросвязь*. – 2018. – № 5. – С. 55–61.
7. *Канащенков, А. И.* К вопросу формирования облика средств управления вооружением нового поколения / А. И. Канащенков, К. Ю. Гаврилов, С. В. Новиков // *Вопросы оборонной техники. Сер. 16: Технические средства противодействия терроризму*. – 2018. – № 5-6 (119-120). – С. 118–122.
8. *Канащенков, А. И.* Малогабаритные интегрированные радиолокационные системы нового поколения для летательных аппаратов / А. И. Канащенков, А. М. Матвеев, Э. С. Минаев, С. В. Новиков // *Известия высших учебных заведений. Авиационная техника*. – 2017. – № 4. – С. 153–157.
9. *Рогов, В. Я.* Экономические характеристики и рынок применения бортовой радиолокационной станции / В. Я. Рогов, С. В. Новиков // *Modern Economy Success*. – 2017. – № 6. – С. 150–153.
10. *Канащенков, А. И.* Модернизация инструментария открытого конкурсного отбора высокотехнологичных проектов / А. И. Канащенков, Э. С. Минаев, С. В. Новиков // *Вестник Казанского государственного технического университета им. А. Н. Туполева*. – 2016. – Т. 72, № 1. – С. 79–85.
11. *Канащенков, А. И.* Возможности применения малогабаритного цифрового радара в самолетной авиации / А. И. Канащенков, А. М. Матвеев, С. В. Новиков // *Труды МАИ*. – 2016. – № 89. – С. 23.

References

1. Kanashenkov A. I. *Formirovanie oblika aviacionnyh sistem upravleniya vooruzheniem* [Formation of the image of aviation weapons control systems]. Moscow: Radiotekhnika, 2006.
2. Kanashenkov A. I. *Teoriya i praktika upravleniya sovremennymi organizacionno-ehkonomicheskimi sistemami (na opyte rossijskikh predpriyatij)* [Theory and practice of management of modern organizational and economic systems (on the experience of Russian enterprises)]. Moscow: Blok-inform-ehkspress, 2000.
3. Antipov V. N., Isaev S. A., Lavrov A. A., Merkulov V. I. *Mnogofunkcional'nye radiolokacionnye komplekсы istrebitelej* [Multi-functional fighter radar systems]. Moscow: Voenizdat, 1994
4. Baluev V. N., Ganulich A. K., Gerasimov V. M., Kozmenko A. I. *Aviacionnye pricel'nye sistemy* [Aircraft sighting systems]. Moscow: VVIA named N. E. Zhukovskogo, 1986.
5. Merkulov V. I., Drogalin V. V., Kanashenkov A. I. *Aviacionnye sistemy radioupravleniya. T.1, Principy postroeniya sistem radioupravleniya. Osnovy sinteza i analiz* [Aviation systems of radio control. V.1, Principles of construction of radio control systems. Basics of synthesis and analysis]. Moscow: Radiotekhnika, 2003.
6. Kanashchenkov A. I., Matveev A. M., Novikov S. V., Krasavin D. S. *Elektrosvyaz'* [Telecommunication]. 2018, no. 5, pp. 55–61.
7. Kanashchenkov A. I., Gavrilov K. Yu., Novikov S. V. *Voprosy oboronnoj tekhniki. Seriya 16: Tekhnicheskie sredstva protivodejstviya terrorizmu* [Questions of defense technology. Series 16: Technical means of countering terrorism]. 2018, no. 5-6 (119-120), pp. 118–122.
8. Kanashchenkov A. I., Matveev A. M., Minaev E. S., Novikov S. V. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Aviacionnaya tekhnika* [Proceedings of higher educational institutions. Aviation technology]. 2017, no. 4, pp. 153–157.
9. Rogov V. Ya., Novikov S. V. *Modern Economy Success*. 2017, no. 6, pp. 150–153.
10. Kanashchenkov A. I., Minaev E. S., Novikov S. V. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. A. N. Tupoleva* [Bulletin of Kazan State Technical University. A. N. Tupolev]. 2016, vol. 72, no 1, pp. 79–85.
11. Kanashchenkov A. I., Matveev A. M., Novikov S. V. *Trudy MAI* [Works of MAI]. 2016, no. 89, p. 23.

Канащенков Анатолий Иванович

доктор технических наук, профессор,
главный конструктор,
директор Научного центра специальных
радиоэлектронных систем и менеджмента,
Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)
(125993, Россия, Москва, Волоколамское шоссе, 4)
E-mail: kai_ncsrm@mail.ru

Kanashchenkov Anatoly Ivanovich

doctor of technical sciences, professor, chief designer,
director of Scientific Center of Special
Radio-Electronic Systems and Management,
Moscow Aviation Institute
(National Research University)
(125993, 4 Volokolamsk highway, Moscow, Russia)

Новиков Сергей Вячеславович

кандидат экономических наук, доцент,
кафедра менеджмента и маркетинга
высокотехнологичных отраслей промышленности,
Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)
(125993, Россия, Москва, Волоколамское шоссе, 4)
E-mail: ncsrm@mail.ru

Novikov Sergey Vyacheslavovich

candidate of economical sciences, associate professor,
sub-department of management and marketing
of high-tech industries,
Moscow Aviation Institute
(National Research University)
(125993, 4 Volokolamsk highway, Moscow, Russia)

УДК 621.396

Канащенко, А. И.

Основные методологические принципы проектирования радиолокационных систем летательных аппаратов нового поколения / А. И. Канащенко, С. В. Новиков // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 3 (23). – С. 71–84. – DOI 10.21685/2307-4205-2018-3-10.

Н. С. Кузнецов, В. В. Смогунов, Л. Р. Фионова, Н. К. Юрков

ГИБРИДНЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ ИНЖЕНЕРИИ ГЕТЕРОСТРУКТУР ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

N. S. Kuznetsov, V. V. Smogunov, L. R. Fionova, N. K. Yurkov

HYBRID INTELLIGENCE ENGINEERED HETEROSTRUCTURES OF COMPUTERS

Аннотация. Показано, что становление и развитие цифровой цивилизации породило принципиально новую проблему взаимодействий в человек-машинной системе, а это в свою очередь создало множество задач в проблеме создания гибридного интеллекта, синтезе надежных систем мехатроники, преодолении барьеров на пути от *homo sapiens* к *homo intellectus* и бесконфликтному миру без катастроф и заблуждений прошлого. Дан анализ концептуальных моделей гибридного интеллекта. Показан путь от технологии инженерии анализа катастроф гетероструктур, созданной на основе использования закона катастроф, к искусственному интеллекту. Главными показателями интеллекта здесь являются умение решать задачи, задаваемые окружающей действительностью, доведение решения задачи до реализации интеллектуального продукта и получение экономического эффекта от реализации в гетерогенной конкурентной среде. Доказано, что все катастрофы на Земле происходят под действием внешних сил (солнечных излучений, электромагнитных полей, силы взаимодействия планет, метеорных потоков и др.), а также определяются воздействием внутренних сил Земли. Проведен системный анализ гибридного интеллекта, задействованного в инженерии гетероструктур, дан анализ моделей программной инженерии гетероструктур, в том числе и моделей, разрабатываемых авторами. Проведено моделирование тепловых и виброударных воздействий, а также исследования гетероструктур кровообращения человека. Показана конкурентоспособность предложенных моделей при решении актуальных проблем современности.

Ключевые слова: вычислительная техника, модели, гибридный интеллект, технологии, инженерия, гетероструктура.

Abstract. It is shown that the emergence and development of digital civilization has created a fundamentally new problem of interactions in a man-machine system, and this, in turn, has created many tasks in the problem of creating hybrid intelligence, the synthesis of reliable mechatronics systems, overcoming barriers on the way from *homo sapiens* to *homo intellectus* and a conflict-free world without catastrophes and delusions of the past. The analysis of conceptual models of hybrid intelligence is given. The way is shown from the technology of engineering of the analysis of the catastrophe of heterostructures, created on the basis of the use of the law of catastrophes, to artificial intelligence. The main indicators of intelligence here are the ability to solve problems set by the surrounding reality, bringing the solution to the problem to the realization of an intellectual product and obtaining the economic effect of implementation in a heterogeneous competitive environment. It is proved that all catastrophes on Earth occur under the influence of external forces (solar radiation, electromagnetic fields, forces of interaction of planets, meteor showers, etc.), and also are determined by the influence of the internal forces of the Earth. A systematic analysis of the hybrid intelligence involved in the engineering of heterostructures was carried out; an analysis of the models of software engineering of heterostructures, including the models developed by the authors, was given. The simulation of thermal and vibro-impact effects, as well as studies of human blood circulation heterostructures, has been carried out. The competitiveness of the proposed models when solving actual problems of modernity is shown.

Key words: computing, models, hybrid intelligence, technology, engineering, heterostructure.

Введение

Инженерия гетерогенных структур мехатроники в современной трактовке – учение о методах и средствах создания надежной мехатроники вычислительной техники.

Инженерия – область человеческой интеллектуальной деятельности, основной задачей которой является применение достижений науки, законов природы, природных ресурсов для решения конкретных проблем и задач, стоящих перед человечеством.

Мехатроника – область науки и техники, посвященная созданию и эксплуатации систем с компьютерным управлением движения, основанная на законах в области механики, электроники, микропроцессорной техники, информатики, а также на компьютерном управлении движения агрегатов.

Мехатронное устройство – это выделившийся в последнее десятилетие новый класс машин, базирующийся на использовании точной механики, электропривода, электроники, компьютерного управления.

В настоящее время в научном сообществе достигнуто понимание острой необходимости учета гетерогенности социотехнологической среды современной цивилизации.

Гетерогенными, по своей глубинной сущности, являются все компоненты цивилизации – страны, народы, экономики, культуры и прочее не только между собой, но и внутри каждого компонента. Эволюция материальных и духовных объектов неизбежно ведет к усилению гетерогенности их структур. Наконец, сам человек представляет собой сложнейшую гетерогенную структуру с растущим множеством подвидов *homo sapiens*.

Становление и развитие цифровой цивилизации создало принципиально новую проблему взаимодействий в гетероструктуре человек-компьютер, а это в свою очередь поставило множество задач в понимании гибридного интеллекта, создании надежных систем мехатроники, преодолении барьеров на пути от *homo sapiens* к *homo intellectus* и бесконфликтному миру без катастроф и заблуждений прошлого.

Этой проблеме и некоторым решениям первостепенных задач посвящена данная статья.

Концептуальные модели гибридного интеллекта

Среди концептуальных моделей гибридного интеллекта выделяют:

– модели, включающие естественный интеллект человека и искусственный компьютерный интеллект;

– модели последовательные, параллельные, смешанные;

– модели, содержащие нейросетевые, генетические, статистические и другие алгоритмы;

– модели, базирующиеся на групповом интеллекте экспертов и искусственном интеллекте;

– модели, рассчитанные на специальные применения – разработки торговых роботов, финансовых прогнозов, системной футурологии и пр.;

– адаптивные системные модели динамики, включающие алгоритмы и программы искусственного интеллекта, ориентированные на конкретного человека вкупе с интеллектом этого человека и групповым интеллектом экспертов по конкретной проблематике [1].

Наряду с фон-неймановской архитектурой программ и моделей со строгим следованием заданному алгоритму используются множество других архитектур – гарвардская, использующая раздельную память для исполняемого кода и данных и позволяющая вносить модификации в саму себя, мутируя таким образом; нейросетевая и другие с внесением человеческих качеств, таких как компетентность и здоровье.

Системный анализ моделей гибридного интеллекта позволяет утверждать, что определяющим в успешности применения той или иной модели является интеллект человека, применяющего ту или иную модель [2].

Проблема понимания процессов образования человеческого интеллекта представляет собой одну из важнейших проблем современной науки и образования [3].

Под интеллектом в настоящее время понимают совокупность умственных функций, которые превращают восприятие в новые знания по некоторому генетически наследуемому и социально выстроенному алгоритму.

Несомненное лидерство в экономике и политике принадлежит странам и территориям с преимущественным развитием методов гибридного интеллекта интеллектуального капитала и технологических инноваций. Дело в том, что интеллект в отличие от материальных активов и ресурсов неисчерпаем: чем более интенсивно государство, регион, индивид употребляют интеллект в деле, тем быстрее и масштабнее интеллект возрастает.

Главными показателями интеллекта являются умение решать задачи, задаваемые окружающей действительностью, доведение решения задачи до реализации интеллектуального продукта и получение экономического эффекта от реализации в гетерогенной конкурентной среде.

Основными компонентами рейтинга конкурентоспособности гибридного интеллекта являются правительство, финансы, инфраструктура, менеджмент, национальная экономика, международные

экономические отделения, люди, наука и технология. Во всех компонентах рейтинга присутствует интеллект. Важными показателями конкурентоспособности территории является имидж лидеров, прежде всего политиков.

Процесс коммуникации осуществляется с помощью слов и понятий, языка и текстов; понимание, интерпретация информации реализуются Я-интеллектом индивида. Структура интеллекта человека с позиций информационно-логического понимания интеллекта представляет собой гетерогенную структуру, основным элементом которого считается сознание. Сознание определяет смысл и цель жизни, а также потребности, интересы и ценности жизни человека и его деятельности, реализуя их через конкретные алгоритмы [4].

Питающей основой – «болотом» интеллекта, необходимой для его жизнедеятельности и эволюции, является социотехнологическая среда. Ценности среды, знания, развивающие среду, в известном смысле, есть отчужденная форма интегрального интеллекта, в котором индивидуальный интеллект принципиально случаен, интеллектуальный процесс – индивидуален и не индивидуален одновременно. Более того, можно констатировать, что существует некая сумма интеллектов всех ранее живших людей – «большое болото», из которого проистекают гибридные интеллекты социумов разных регионов мира.

Многие ученые в настоящее время по разным научным специальностям, в разных странах мира констатируют кризис современной цивилизации и выделяют социальную сущность противоречий, из-за которых кризис цивилизации развивается. Интегрируя эти противоречия, можно выделить противоречия цивилизации с природой, противоречия человека с человеком, противоречия человека с самим собой. Если первых две группы противоречий понятны, более или менее изучены и могут разумно решаться, то противоречия человека с самим собой, как и прежде, являются наименее изученными и наиболее опасными. Одним из возможных путей преодоления этого противоречия является понимание прогрессивности гибридного интеллекта как суммы естественного человеческого интеллекта и современных средств коммуникаций, решающей в значительной мере эту проблему.

Нельзя не отметить существенное ускорение эволюции цивилизации за счет развития гибридного интеллекта, включающего, в нашем понимании, все современные средства коммуникаций – транспорт, связь, телевидение, компьютерные системы.

Сумма естественного интеллекта индивида и гибридного интеллекта компьютерной системы всегда предпочтительнее суммы индивидуальных интеллектов, даже самых мощных, при решении противоречий человека с самим собой. Одной из возможных реализаций теоретических результатов может быть известная идея о вживлении в организм человека микрочипов взаимодействия интеллекта человека с компьютерными программами, в частности проекты создания нейрокомпьютерных оболочек головного мозга, т.е. по существу усилителей интеллекта человека или «идеального» гибридного интеллекта [4, 5].

Нашими исследованиями моделей гибридного интеллекта установлены некоторые закономерности при решении задач, намеченных во введении, а также создан информационно-измерительный комплекс «Динамика гетерогенных структур».

Информационно-измерительный комплекс «Динамика гетерогенных структур» содержит:

Часть 1. Обработка больших массивов информации. Классификация. Отбрасывание резко выделяющихся данных. Параметрические, непараметрические критерии. Средние, дисперсии. Последовательный анализ. Корреляции. Регрессии. Выбор новых закономерностей. Проверка гипотез. Экспериментальная проверка.

Часть 2. Визуализация внешнего вида. Цифровая флуоресцентная наноскопия. Интроскопия гетероструктур. Определение собственных частот и форм колебаний. Лазерная интерферометрия. Оптико-электронное зондирование.

Часть 3. Алгоритмы и программы математического моделирования напряженно-деформированного состояния гетероструктур; нестационарных тепловых полей, в том числе с фазовыми переходами; вибрационных и ударных процессов.

Инженерия анализа катастроф гетероструктур

Технологии инженерии анализа катастроф гетероструктур строятся на использовании закона катастроф, которая формулируется следующим образом. Все катастрофы на Земле происходят под действием внешних сил – солнечных излучений, электромагнитных полей, силы взаимодействия

планет, метеорных потоков. Наряду с внешними силами определенное воздействие оказывают внутренние силы Земли.

Важнейшими силовыми воздействиями являются ударные воздействия метеоритов на земную поверхность. Именно с ними связаны катастрофические землетрясения, цунами, извержения вулканов.

Не менее катастрофическое влияние оказывают мощные электромагнитные бури. Операторы энергетических систем, водители транспортных средств, руководители различных рангов, принимающих ответственные решения, теряют, как известно, ориентацию в пространстве состояний; сложные мехатронные системы также часто оказываются под действием электромагнитных импульсов и полей. Недостаточная надежность мехатроники приводит к малоэффективной несвоевременно предупреждающей информации о возможных катастрофах.

Большинство крупных катастроф, таких как землетрясения, связаны с бомбардированием Земли метеоритами – атомная станция Фукусима, арсеналы вооружений, химические, металлургические, нефтедобывающие и перерабатывающие производства, катастрофы космических кораблей, самолетов всегда связаны с недостаточной исследовательностью гетероструктур защиты и управления, включая гетероструктуры человека.

Современная цивилизация – это компьютерная цивилизация, это время перехода биовида *homo sapiens* в *homo intellectus*, когда гибридный интеллект человека и компьютера превращает обычную технику в мехатронную, имеющую сложную гетерогенную структуру.

Постоянные аварии и катастрофы космической техники, энергетического оборудования, самолетов, судов, военной техники и вооружений убедительно свидетельствуют о недостаточной изученности гетероструктур.

Блестящее решение данной проблемы по гетеропереходам твердотельной микроэлектроники – важнейшей гетероструктуры мехатроники, дал выдающийся русский физик, академик РАН, лауреат Нобелевской премии Ж. И. Алферов.

В электронике гетероструктура – выращенная на подложке многослойная структура из различных полупроводников, отличающихся шириной запрещенной зоны. За развитие полупроводниковых гетероструктур для высокоскоростной оптоэлектроники Ж. И. Алферов получил Нобелевскую премию 2000 г. Полупроводниковый лазер, сделанный Ж. И. Алферовым в физтехе, представляет собой многослойную гетероструктуру $Me - SiO_2 - P^+GaAs - pAlGaAs - pGaAs - pAlGaAs - nGaAs - Me$ с толщиной пакета 12 мкм, выполненную по технологии молекулярно-пучковой эпитаксии. Основой получения надежных полупроводниковых гетероструктур является, по Ж. И. Алферову, близость параметров кристаллических решеток материалов гетеропереходов, что подтверждает надежность работы мехатроники на космических станциях.

Таким образом, в XX в. установлен факт фундаментальности эволюции полупроводников через гетерогенность гетеропереходов и получение надежных гетероструктур путем гомогенизации гетеропереходов на уровне параметров кристаллических решеток.

В мехатронике, состоящей из механических, электротехнических, электронных и компьютерных узлов, гетеропереходы выполняются по паяным, сварным, клеевым, напыляемым, осаждаемым, опрессованным, заливным и другим технологиям. Это соединения кристаллических, аморфных, жидкокристаллических, дискретных и дискретно-непрерывных материалов (табл. 1).

Таблица 1

Классы гетероструктур	Гетероструктуры
Наногетерогенные полупроводники	$Me - SiO_2 - GaAs - pAlGaAs - pAlGaAs - nGaAs - Me$
Микрогетерогенные проводники и диэлектрики	Стали, сплавы, керамика, стекло, полимеры, композиты и т.п.
Мезагетерогенные соединения разнородных материалов	Металл-керамика, керамика, керамика-стекло, стекло-металл, металл-полимер, полимер-стекло, металл-полупроводник
Макрогетерогенные структуры	Механика, электротехника, микроэлектроника, машины, оборудование, здания, сооружения
Мегагетерогенные системы	Солнечная система, Земля, природа, человек, цивилизация
Многофазные структуры	Твердое тело-жидкость, твердое тело-газ, газ-жидкость
Динамические структуры	Жесткозакрепленные, подвижные, разъемные, неразъемные

По данным российских симпозиумов по надежности, пассивные и активные компоненты мехатроники состоят на 90...99 % из гетеропереходов, количество отказов электронных компонентов в 60...90 % случаев связано с отказами гетероструктур. Анализ гетеропереходов, применяющихся в механике, электротехнике, компьютерах показывает, что это резьбовые соединения – 51 %, паяные – 12 %, развальцованные – 9 %, запрессованные – 9 %, клепанные – 7 %, сварные – 4 %, клеевые – 4 %, зачеканенные – 3 %, обжатые – 3 %, намотанные – 2 % и именно эти гетеропереходы в основном определяют надежность мехатроники [6, 7].

Технологически передовыми мехатронными системами являются, в первую очередь, вооружения и военная техника. Министр обороны РФ генерал армии С. К. Шойгу приводит следующие данные по исправной, стоящей на вооружении армии и флота, технике. Военно-космические войска по авиации обладают 63 % исправной техники, противовоздушной обороне – 96 %, в военноморском флоте – 76 %, бронетанковых войсках – 94 %, по ракетно-артиллерийским вооружениям – 93 %. Американские данные не противоречат приведенным и дополняют их данными по отказам американской техники – большая часть неисправностей связана с отказами компьютерных гетероструктур, включая программное обеспечение. Аналогичные данные публикуют страны члены НАТО.

На наш взгляд, это объективные данные, согласующиеся с общими сведениями по влиянию различных факторов на надежность техники. Наибольшее влияние оказывают температурные, вибрационные и ударные воздействия [6–8].

Поскольку подавляющее большинство гетеропереходов представляет собой соединения разнородных материалов, требуются новые подходы к обеспечению надежности гетероструктур мехатроники. Одним из плодотворных подходов является динамика гетерогенных структур, базирующаяся на системных моделях гибридного интеллекта в технологиях инженерии гетероструктур [9].

Современные изделия мехатроники представляют собой набор блоков, состоящих в зависимости от назначения изделия из блоков приема, передачи и обработки информации, а также блоков питания, преобразователей, исполнительных и т.п.

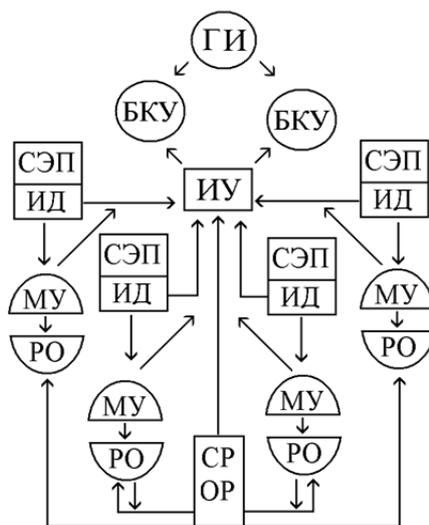


Рис. 1. Обобщенная структура мехатронной системы: ГИ – гибридный интеллект; БКУ – блоки компьютерного управления; ИУ – информационное устройство; СЭП – силовые электронные преобразователи; ИД – исполнительные двигатели; МУ – механическое устройство; РО – рабочий орган; ОР – объект работ

Основными элементами блока являются платы с установленными на них электрорадиоизделиями, элементами коммутации, корпусов и рабочей среды. Платы представляют собой пластины-носители электрорадиоизделий. Платы могут быть выполнены из фольгированного стеклотекстолита – однослойные и многослойные с коммутирующими элементами из фольговых медных проводников, а также из керамики или металла с многослойным покрытием из слоев диэлектриков и металлических коммутирующих слоев. Электрорадиоизделия выполняют роль функциональных элементов блока. Назначение, устройство и конструктивное оформление электрорадиоизделий ва-

рируются неограниченно, однако все варианты имеют, по меньшей мере, два сходных признака: все без исключения электрорадиоизделия имеют электрические вводы-выводы, практически во всех случаях электрорадиоизделия крепятся к плате [8, 9].

Подавляющее большинство технологических операций при нанесении покрытий, монтаже, сборке и герметизации изделий представляют собой операции соединения различных его элементов и деталей.

Считается, что в любом изделии всегда можно выделить конструктивный элемент, процессы в котором явились причиной отказа. При установлении причины и механизма отказов объектом физико-химического анализа являются не конструктивные, а определенные физические структуры, вплоть до моноатомных слоев. За границу структуры принимают поверхность, на которой скачкообразно изменяются термодинамические параметры в пространстве и во времени.

Современный анализ отказов предполагает три основных группы задач и методов проведения анализа: обобщение информации об отказах, инструментальное исследование отказов, математическое моделирование процессов, приводящих к отказам с использованием детерминированных моделей математической физики.

Обобщение и анализ информации об отказах изделий проводилось по отчетам и обзорам Центров анализа отказов, а также с привлечением реальных данных по технически неизбежному отходу и браку в процессе серийного производства с использованием алгоритмов информационного обеспечения анализа отказов.

Суммировав и обработав информацию по всем проанализированным источникам, можно утверждать, что самыми отказывающимися элементами конструкций являются различного рода соединения разнородных материалов. В частности наибольшее число отказов приносят соединения, по которым проходят электрические сигналы. Это явление получило специальное название «Тирания контактных соединений». Переход от дискретной технологии к интегральной позволил в существенной мере решить проблему повышения надежности операционных элементов изделий, однако не устранил «тирании контактных соединений», значительная часть приборов в интегральном исполнении отказывают из-за дефектности контактных электромонтажных соединений. Более того, переход к интегральным технологиям привел к тому, что современное изделие, изготовленное по этой технологии, например, на 90 % состоит из соединений разнородных материалов, при этом до 95 % отказов приходится на отказы соединений разнородных материалов.

Детальный анализ информации об отказах изделий в производстве опытных образцов изделий, при изготовлении установочных партий и серийных изделий с одной стороны, технологических потерь и брака – с другой и, наконец, информации об отказах из эксплуатации, показывает, что причинами отказов в подавляющем большинстве случаев являются отказы сварных и паяных соединений многослойных структур и залитых соединений разнородных материалов [10, 11].

Анализ комплекса тепловых воздействий производства гетероструктур, сборок с их применением воздействующих факторов эксплуатации позволяет из рассматриваемого множества задач по определению тепловых полей выделить три типовые задачи, характерные для всего множества в целом.

В первой задаче температура окружающей среды предполагается заданной функцией времени $T = f(\tau)$, эта задача соответствует технологическому процессу спаивания гермопереходов в печи.

Во второй задаче предполагается известным и однородным поле температур $T_0 = \text{const}$ в начальный момент времени. Это соответствует случаю, когда гермопереход нагрет в печи и выдержан в ней настолько долго, что температура во всех его точках успела полностью выровняться. В момент времени $\tau = 0$ задается температура, являющаяся заданной функцией в последующие моменты времени. Эта задача соответствует режимам технологического термоциклирования, сушки, климатических испытаний и т.п.

В третьей задаче на торцевой поверхности токоввода в момент времени $\tau = 0$ задается температура, являющаяся заданной функцией в последующие моменты времени. Эта задача соответствует технологическим режимам пайки или сварки подводящих проводников.

Во всех трех задачах нужно определить зависимость температуры и ее производных по координатам от времени. Математическая модель, соответствующая рассмотренным задачам, строится следующим образом: рассматривается составной цилиндр, температурное поле в котором удовлетворяет системе уравнений нестационарной теплопроводности:

$$\frac{\partial T_j(r, z, \tau)}{\partial \tau} = a_j \left\{ \frac{\partial^2 T_j(r, z, \tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_j(r, z, \tau)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_j(r, z, \tau)}{\partial z^2} \right\}; \quad (\tau > 0, 0 \leq r \leq R_j),$$

где T_j – температура; r, z – координаты; τ – текущее время; a_j – температуропроводность.

Краевые условия заданной задачи имеют вид

$$T_1(r, z, 0) = T_2(r, z, 0) = T_3(r, z, 0) = T_4(r, z, 0) = T_5(r, z, 0) = \text{const.}$$

На границе j и $j + 1$ слоев:

$$\begin{aligned} T_j(r, z, \tau) &= T_{j+1}(r, z, \tau); \\ \lambda_j \frac{\partial T_j(r, z, \tau)}{\partial r} &= \lambda_{j+1} \frac{\partial T_{j+1}(r, z, \tau)}{\partial r}; \end{aligned}$$

на оси: $r = 0$

$$\frac{\partial T(0, z, \tau)}{\partial r} = 0;$$

на торцах: $z = 0, L$

$$\pm \lambda_j \frac{\partial T_j(r, z, \tau)}{\partial z} + \alpha_j \{T_C - T_j(r, z, \tau)\} = 0;$$

на боковой поверхности: $r = R_5$

$$-\lambda_5 \frac{\partial T_5(r, z, \tau)}{\partial r} + \alpha_5 \{T_C - T_5(r, z, \tau)\} = 0.$$

Здесь λ_j – коэффициент теплопроводности j -го слоя; α_j – коэффициент теплообмена j -го слоя; T_C – температура окружающей среды.

Аналитическое решение рассмотренной задачи нам не известно, среди известных решений рассмотрена задача о двухслойном составном цилиндре. Наиболее целесообразным подходом к решению поставленной задачи представляется разработка численного алгоритма, при этом система уравнений может быть приведена к системе уравнений теплового баланса для элементарных объемов. Разбивая конструкцию гермоперехода на элементарные слои – кольца – N слоев по радиусу M – слоев по высоте, можно для каждого кольца проинтегрировать уравнение теплопроводности по объему и получим

$$\int_{V_j} \frac{\partial T_j(r, z, \tau)}{\partial \tau} dV = \alpha_j \int_{V_j} \Delta T dV;$$

интеграл $\int_{V_j} \Delta T dV$ по теореме Остроградского – Гаусса равен интегралу $\int_{S_j} \nabla T \cdot dS$, и тогда его можно

заменить для каждого слоя выражением

$$\int_{V_j} \frac{\partial T_j(r, z, \tau)}{\partial \tau} dV = V_{ij} \frac{dT_{ij}}{d\tau}.$$

В результате получается система уравнений в полных производных $N \cdot M$ порядка, решаемая методом Рунге – Кутты четвертого порядка.

В вычислительном эксперименте при решении второй технологической задачи установлено наличие ранее не известного импульса градиента температур в угловой точке соединения разнородных материалов. Этот эффект заключается в появлении на начальном этапе охлаждения соединения разнородных материалов, в первые несколько секунд разности температур на поверхности диэлектрика и металла и быстром изменении градиента температуры от нуля до максимума и от максиму-

ма до некоторого значения в указанном интервале времени. Другой стороной этого эффекта является смена знака градиента температуры в тонком поверхностном слое в окрестности угловой точки. Параметры импульса градиента температуры зависят от соотношений теплофизических характеристик соединяемых материалов и условий охлаждения [12].

Результаты вычислительного эксперимента при решении третьей задачи нестационарной теплопроводности гетероструктур подтверждают экспериментальные результаты. При импульсных тепловых воздействиях пайки и сварки на токоввод основную роль в термостойкости играет локализация градиента температуры в угловых точках соединения диэлектрика с токовводом. Это явление приводит к микротрещинам и последующей негерметичности и обусловлено существенным различием тепловых коэффициентов соединяемых материалов.

Системное рассмотрение комплекса тепловых воздействующих факторов производства и эксплуатации позволяет утверждать, что проблема обеспечения качества гетероструктур при импульсных тепловых воздействиях на токоввод не может быть успешно решена известными способами. Одним из эффективных путей кардинального решения этой проблемы может быть способ изготовления гермопереходов с защитой торцовых поверхностей теплопроводящими полимерными композициями.

Решение рассмотренных технологических задач нестационарной теплопроводности гетеропереходов на основе разработанных математических моделей, алгоритмов и программ расчетов позволяет теоретически обоснованно подойти к вопросам проектирования технологии производства гетероструктур и одновременно сформулировать основные требования к конструкции гермопереходов и применяемым материалам. Например, предложены комплексы характеристик и коэффициентов термостойкости микрогетерогенных материалов:

$$K = \frac{\sigma_b \lambda (1 - \mu)}{C \gamma \alpha E},$$

где σ_b – предел прочности; λ – коэффициент теплопроводности; μ – коэффициент Пуассона; C – теплоемкость; γ – удельный вес; α – КЛТР; E – модуль упругости.

Для мезагетерогенных соединений разнородных материалов предлагается использование материалов с близкими физико-механическими характеристиками [13].

Для макрогетерогенных изделий мехатроники дополнительно вводятся диссипативные характеристики структур.

Важнейшими технологиями инженерии гетероструктур являются экспериментальные технологии оценки форм колебаний и волн в мехатронных системах. Например, изучение динамики ленточных моделей и многослойных пластинчатых моделей не вполне канонических форм с помощью динамических фигур Вдовикиной. Анализ результатов позволяет сделать вывод о характере распространения волновых процессов в многослойных гетерогенных пластинчатых структурах.

Моделировались колебания трапецевидной, овальной и треугольной пластинчатых структур, в последнем случае – со сложной формой гипотенузы.

Важнейшими технологиями инженерии гетероструктур являются экспериментальные технологии оценки волновых процессов. Например, изучение динамики ленточных моделей и многослойных пластинчатых моделей не вполне канонических форм с помощью динамических картин. Анализ результатов позволяет сделать вывод о характере распределения волновых процессов в многослойных гетерогенных пластинчатых структурах.

Моделировались колебания и волны в трапецевидных, овальных и треугольных пластинчатых структурах, в последнем случае – со сложной формой гипотенузы. Модели всех форм – геометрически симметричные, имели ребро жесткости, совпадающее с осью симметрии и скрепленное с пластиной в центре масс или в трех точках вдоль продольной оси жесткости. Исполнение моделей отличалось от канонических случаев наличием граничных условий (консольное защемление) по оси симметрии, а не по краям. Источник возмущения располагался снизу в области центра масс. Для визуализации картин использовались стеклянные микросферы в бакелитовой оболочке.

Картинки в целом нестабильны в смысле динамичности самой фигуры – на фоне некоторой разряженности скопившейся среды (серый фон на рис. 2) наблюдалась ее концентрация на узловых линиях спиральной формы (черные линии) и движения волны вдоль узловых линий. Направление перемещения среды показаны стрелками. Наличие вихрей экспериментально доказывает появление

в определенном диапазоне частот связанных колебаний различных видов: продольных, поперечных, крутильных.

В модели космических кораблей типа Шатлл кроме динамических фигур (серый фон со спиральями) присутствуют статические (черный фон), свидетельствующие об отсутствии перемещений в этих зонах (рис. 2).

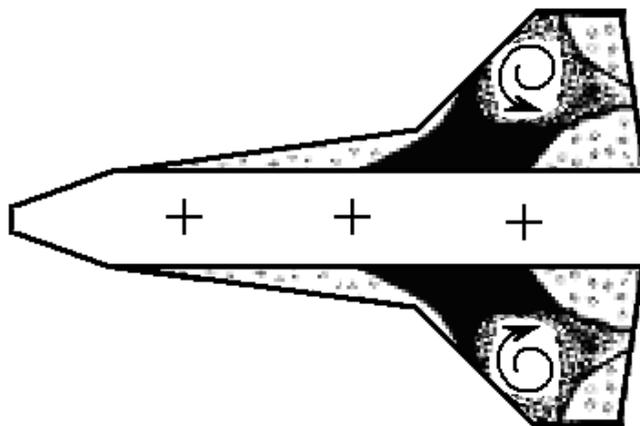


Рис. 2. Космический корабль типа Шатлл

Зоны пучностей занимают передние кромки пластин. При закреплении ребра жесткости в центре масс имеется зона пучности в области ребра жесткости в более широкой (хвостовой) части модели. Обнаруженные зоны пучностей по локализации совпадают с зонами разрушения в области передней кромки крыла и в области оси жесткости космического корабля «Колумбия» – точки на рис. 2.

Инженерия исследований гетероструктур программиста

Технологии инженерии исследования гетероструктур человека построены на теории эволюции человека и применения ИВК ДГС.

Вероятно, самой актуальной проблемой XXI в. является проблема безопасности социотехносферы как результата жизнедеятельности населения Земли. А в центре этой проблемы – безопасность человека. В связи с чем рассмотрен процесс трансформации человека как биовида и основные угрозы для человечества: воздействие внешних возмущений из космического пространства, нежелание человека заботиться о своем собственном здоровье через самоконтроль основных предикторов.

Трансформация человека и социотехносферы – многовековой сложнейший процесс зарождения и гибели гетероструктур. Считается, что современный физический биовид человека сформировался около 50 тыс. лет назад и с тех пор развивался сам и создавал способы и средства выживания, а также орудия облегчения своего труда, саморазвиваясь в приобретении знаний, умений, навыков.

С позиций современной генетики биовид *homo sapiens* включал бесконечное множество людей с разнородными качествами. Во все времена рождались люди генетически, а не воспитанием и самовоспитанием созданные выдающимися. Например, индийский принц – просветленный, стал Буддой, основоположником буддизма; Александр Македонский – родился великим полководцем; мессия Иерусалима Иисус Христос – чудотворец, миротворец, распятый римлянами и др. Как известно, эволюция животного – путь видовой специализации, связанной с занятием тем или иным видом своей особенной ниши, устраняющей конкуренцию с другими видами. Основной путь биологической эволюции у *homo sapiens* заключается в специализации конкурентной борьбы. Использование методологии гибридного интеллекта для определения эволюционной цепочки видов человека позволило выдвинуть гипотезу о массовой трансформации в настоящее время человека через древние подвиды *homo habilis* и *homo erectus* к кроманьонцам и далее – *homo sapiens, faber, stepitans, ludens, creators, symbol analyst, informatikus, contrjlis, solis, kibernetik organon, posthuman gumanistics* и чисто футуристической формы *homo immortalis omnipotent* в реально создающей новую социотехносферу – *homo intellectus* (рис. 3).

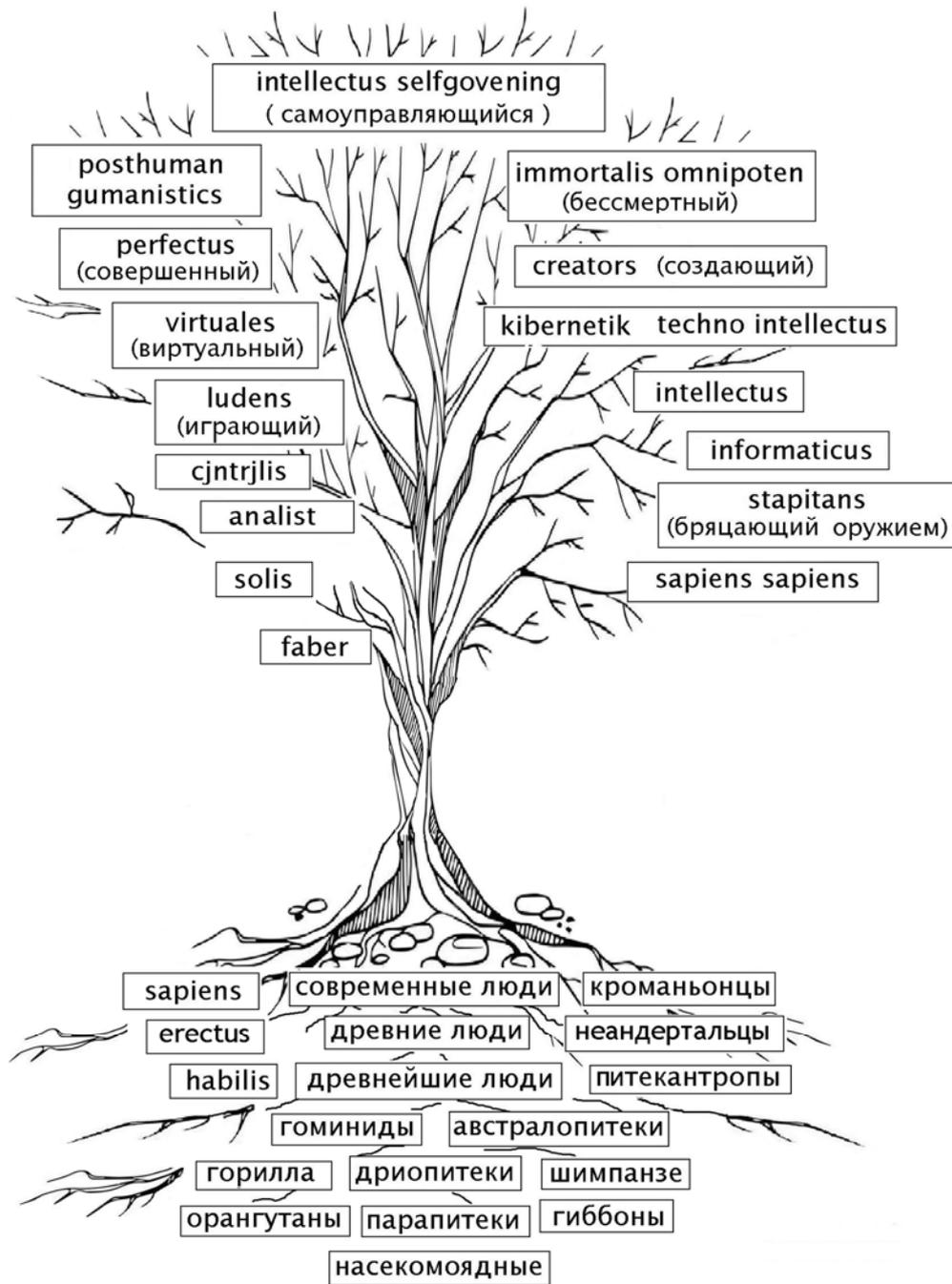


Рис. 3. Эволюционная цепочка видов человека

Выдвинутая гипотеза весьма убедительно подтверждается анализом исследований ученых многих специальностей: генетиков, антропологов, биологов, философов, психологов, социологов, инженеров и др. Доля физического труда повсеместно уменьшается при неуклонном увеличении доли умственного труда. Постиндустриальное общество превращается в цифровую цивилизацию, отдельные государства через процессы глобализации превращаются в единую социотехнологическую сферу [14].

Основной гетероструктурой человеческого организма, определяющей нормальное функционирование всех систем, является интегративная метасистема кровообращения, включающая мозг, сердце, сосуды, кровь, а также лимфатическую, эндокринную и нервную системы. Кровообращение представляет собой сверхсложную систему с гетерогенной структурой и нейрогуморальным регулированием функционирования. Нарушения в ней приводят к рассинхронизации всех систем, болезням сердца, сосудов, головного мозга.

Заболееваемость сердца и сосудов превратились в главную проблему для большинства населения Земли, что однозначно связывается с умственной деятельностью [15]. Доказано стимулирующее влияние гибридного интеллекта на процессы развития социотехносферы XXI в., особенно усилившееся во второй половине XX в. после создания микрочипов, системных программ анализа и моделирования умственных процессов [15].

Компьютер, *INTERNET*, средства коммуникации коренным образом изменили жизнь, обеспечивая человека бесконечными возможностями повышения собственного интеллекта и превращения индивидуального интеллекта в гибридный с информационной базой мирового интеллекта. Психика человека далеко не всегда подготовлена к этому и реагирует обострением системных противоречий с социотехносферой, человека с человеком и человека с самим собой. Особую роль играют противоречия человека с самим собой, поскольку именно они ведут к разрушению гармонии жизни, складывающуюся, как правило, к 30-летнему возрасту. Разрушение гармонии жизни приводит к дисбалансам душевного равновесия, кардионеврозам, нарушениям в сердечно-сосудистой системе, инфарктам и инсультам. Частота инфарктов и инсультов с возрастом от 30 до 50 лет возрастает в 100 раз, для людей старше 50 лет – почти 90 % от общей летальности. По официальным данным ООН, в XXI в. в среднем за год умирает около 30 млн человек. При этом с каждым годом процент умерших от инфарктов и инсультов в общей смертности прирастает от 60 до 70 % по разным регионам мира. 2015 г., по предложению В. В. Путина, был объявлен национальным годом борьбы с сердечно-сосудистыми заболеваниями. В процессе выполнения Государственной программы Минздрава РФ выяснилось, что главная проблема заключается во временных запаздываниях медицинской помощи, незнании многими людьми своих заболеваний и ошибок диагностики. Признано чрезвычайно важным ведение самоконтроля давления и пульса, т.е. по существу кровообращения. Использование гибридного интеллекта в анализе предвестников катастроф позволило авторам доказать необходимые для самоконтроля кровообращения предвестники: систолическое, диастолическое, пульсовое давление и их отношения к пульсу, частота сердечных сокращений и вязкость крови.

Применение методологии гибридного интеллекта к анализу данных о кровообращении позволило установить системы связи и закономерности функционирования кровообращения.

Динамика гетероструктур кровообращения зависит от физиологических и функциональных факторов, связанных с воздействием внешних сил. Образ жизни, температура окружающей среды, атмосферное давление, влажность, психоэмоциональные нагрузки непосредственным образом влияют на работу системы кровообращения. Установлено, что активность солнца, изменение атмосферного давления, геомагнитного поля Земли существенно влияют на работу системы кровообращения. Установлены также системные связи максимумов основных метеорных потоков с максимальными землетрясениями, наводнениями и пр. По результатам интеллектуального анализа траектории космических объектов, строения солнечной системы и географии землетрясений выдвинута гипотеза существования экваториальной зоны Земли между тропиками Рака и Козерога, где происходит 95 % землетрясений, инициированных внешними силами и не всегда совпадающими с очертаниями литосферы планеты [14].

Заключение

Определена основная тенденция эволюции компьютерной цивилизации – нарастание гетерогенности материальных и духовных структур современных технологий и социотехнологической сферы.

Сформулирована фундаментальная проблема взаимодействий в гетероструктурах человек-компьютер и первостепенные задачи в ее решении: задача обеспечения конкурентоспособности гибридного интеллекта; задача создания надежных систем мехатроники; задача гуманизации развития современного подвида *homo sapiens – homo intellectus*.

Решена задача создания конкурентоспособной модели гибридного интеллекта на основе фундаментальных алгоритмов и программ в рамках информационно-вычислительного комплекса «Динамика гетерогенных структур».

Предложены и реализованы технологии инженерии анализа катастроф гетероструктур, установлена основная причина катастроф и отказов гетероструктур – напряженно-деформированное состояние соединений разнородных материалов и гетероструктур кровообращения человека. Открыт импульс градиента температуры на поверхности гетероструктур, ответственный за спусковой меха-

низм процессов, приводящих к катастрофам. Определены комплексы характеристик микрогетерогенных структур, обобщающие комплекс параметров кристаллических решеток Алферова Ж.И. на поликристаллические, аморфные, дискретные микрогетероструктуры. Установлены комплексы для меза- и макрогетероструктур.

Выдвинута и подтверждена гипотеза о массовой трансформации биовида *homo sapiens* во множество подвидов с базовым подвидом – *homo sapiens intellectus*.

Заключение

В результате проведенных исследований предложены, апробированы и внедрены конкурентоспособные алгоритмы, программы и методики, обеспечивающие решение первостепенных задач создания безотказных соединений разнородных материалов для надежного функционирования гетероструктур человек – компьютер, а также мехатронных систем вычислительной техники.

Библиографический список

1. Клачек, П. М. Гибридные адаптивные интеллектуальные системы / П. М. Клачек, С. Н. Корягин, А. В. Колесников, Е. С. Миронова. – Калининград : Изд-во БФУ им. И. Канта, 2011. – 371 с.
2. Гибридный интеллект / В. В. Смогунов, Е. А. Ломтев, О. В. Кузнецова, В. В. Кашаева, В. В. Богонин. – Пенза : Изд-во ПензГУ, 2007. – 138 с.
3. Кузнецова, О. В. Образование интеллекта / О. В. Кузнецова, В. В. Смогунов, А. А. Землянский, О. А. Вдовикина. – Бишкек : Илим, 2009. – 246 с.
4. [https://riouru/science/20170914/1504708975, html](https://riouru/science/20170914/1504708975.html).
5. Smogunov, V. V. Law of disasters. Intellectual analysis / V. V. Smogunov. – Germany : Academic Press, 2013. – 106 p.
6. Шкляр В. Н. Надежность систем управления / В. Н. Шкляр. – Томск : Изд-во ТПУ, 2009, 126 с.
7. Литвинов, А. Н. Приближенный метод расчета эффективности гетерогенных вибродемпфирующих покрытий / А. Н. Литвинов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2009. – Т. 1. – С. 342–344.
8. Литвинов, А. Н. Моделирование напряженно-деформированного состояния слоистого покрытия при динамическом нагружении / А. Н. Литвинов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2015. – Т. 1. – С. 20–22.
9. Смогунов, В. В. Динамика гетерогенных структур / В. В. Смогунов, О. А. Вдовикина, И. П. Климинов, В. А. Шорин. – Пенза : Изд-во ПензГУ, 2001. – 311 с.
10. Егоров, А. М. Анализ возможных отказов типового наноспутника / А. М. Егоров // Известия вузов. Приборостроение. – 2016. – Т. 59, № 6. – С. 471–476.
11. Смогунов, В. В. Инженерия алгоритмов и моделей наноразрушения гетероструктур / В. В. Смогунов, Н. К. Юрков, Н. С. Кузнецов // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 2. – С. 16–22.
12. Свєрбилов, В. Я. Основа мехатроники / В. Я. Свєрбилов. – Самара : Самарский ГУ, 2011.
13. Эволюция моделей интеллекта / А. Н. Якимов, О. В. Кузнецова, В. В. Смогунов. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2008. – 216 с.
14. Смогунов, В. В. Модели динамики гетероструктур энергетики / В. В. Смогунов, Н. С. Кузнецов, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 3 – С. 25–32.
15. Чазова, И. Е. Болезни систем кровообращения / И. Е. Чазова, Е. В. Ощепкова, Л. А. Бокерия, Р. Г. Гудкова // Аналитический вестник. – 2015. – № 44. – С. 4–19.

References

1. Klachek P. M., Koryagin S. N., Kolesnikov A. V. et al. *Gibridnye adaptivnye intellektual'nye sistemy* [Hybrid adaptive intelligent systems]. Kaliningrad: Izd-vo BFU im. I. Kanta, 2011, 371 p.
2. Smogunov V. V., Lomtev E. A., Kuznetsova O. V. et al. *Gibridnyj intellekt* [Hybrid intelligence]. Penza: Izd-vo PenzGU, 2007, 138 p.
3. Kuznetsova O. V., Smogunov V. V., Zemlyansky A. A. et al. *Obrazovanie intellekta* [Education intellect]. Bishkek: Ilim, 2009, 246 p.
4. Available at: <https://riouru/science/20170914/1504708975.html>
5. Smogunov V. V. *Law of disasters. Intellectual analysis*. Germany: Academic Press, 2013, 106 p.
6. Shklyar V. N. *Nadezhnost' sistem upravleniya* [Reliability control systems]. Tomsk: Izd-vo TPU, 2009, 126 p.
7. Litvinov A. N. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Works of the international symposium Reliability and quality]. 2009, no. 1, pp. 342–344.
8. Litvinov A. N. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Works of the international symposium Reliability and quality]. 2015, no. 1, pp. 20–22.

9. Smogunov V. V., Vdovikina O. A., Kliminov I. P. et al. *Dinamika geterogennyh struktur* [Dynamics of heterogeneous structures]. Penza: Izd-vo PenzGU, 2001, 311 p.
10. Egorov A. M. *Izvestiya vuzov, priborostroenie* [Proceedings of the universities, Instrument Engineering]. 2016, vol. 59, no. 6, pp. 471–476.
11. Smogunov V. V., Yurkov N. K., Kuznetsov N. S. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnyh sistem* [Reliability and quality of complex systems]. 2017, no. 2, pp. 16–22.
12. Sverbilov V. Ya. *Osnova mekhatroniki* [The basis of Mechatronics]. Samara: Samarskij GU, 2011.
13. Yakimov A. N., Kuznetsova O. V. et al. *Evolutsiya modeley intellekta* [Evolution of models of intelligence]. Penza: Izd-vo PGU, 2008, 216 p.
14. Smogunov V. V., Kuznetsov N. S., Yurkov N. K. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnyh sistem* [Reliability and quality of complex systems]. 2017, no. 3, pp. 25–32.
15. Chazova I. E., Oshchepkova E. V., Bockeria L. A. et al. *Analiticheskij vestnik* [Analytical Bulletin]. 2015, no. 44, pp. 4–19.

Кузнецов Никита Сергеевич

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

Смогунов Владимир Васильевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра теоретической и прикладной механики
и графики,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: tmpg@pnzgu.ru

Фионова Людмила Римовна

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой информационного
обеспечения управления и производства,
декан факультета вычислительной техники,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: lrfionova@mail.ru

Юрков Николай Кондратьевич

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

Kuznetsov Nikita Sergeevich

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

Smogunov Vladimir Vasilyevich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of theoretical
and applied mechanics and graphics,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Fionova Lyudmila Rimovna

doctor of technical sciences, professor,
head of sub-department of information
management and production support,
dean of the faculty of computer engineering,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Yurkov Nikolay Kondrat'evich

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

УДК 004.42:531.3

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. – DOI 10.21685/2307-4205-2018-3-11.

А. П. Адамов, С. Г. Семенов, А. Т. Темиров

БАЛАНСИРОВКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СЕНСОРОВ В БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЯХ¹

A. P. Adamov, S. G. Sementsov, A. T. Temirov

BALANCING THE ENERGY PERFORMANCE OF SENSORS IN WIRELESS SENSOR NETWORKS

Аннотация. В работе предложен метод балансировки энергетических характеристик сенсоров в беспроводных сетях. Метод основан на использовании энергии в радиодиапазоне сенсоров, передающих данные. Неактивные в данный момент сенсоры могут принимать и детектировать пакеты данных и использовать их для подзарядки источника питания. Эффективность использования энергии определяется точностью согласования приемной антенны с входным контуром и падением напряжения на выпрямительном модуле. Проведен анализ относительных потерь в зависимости от частоты для типовой антенны беспроводного диапазона.

Ключевые слова: беспроводные сенсорные сети, кластеризация, выбор вершины кластера, динамическая балансировка нагрузки, энергия радиодиапазона, импеданс приемной антенны, зарядка от беспроводного интерфейса.

Abstract. The paper proposed a method of balancing the energy characteristics of sensors in wireless networks. The method is based on the use of energy in the radio range of sensors transmitting data. The currently inactive sensors can receive and detect data packets and use them to recharge the power supply. Energy efficiency is determined by the accuracy of matching the receiving antenna with the input circuit and the voltage drop across the rectifier module. The analysis of relative losses depending on the frequency for a typical antenna of the wireless range.

Key words: wireless sensor networks, clustering, cluster vertex selection, dynamic load balancing, radio band energy, receiving antenna impedance, charging from a wireless interface.

Введение

Актуальность работы обусловлена все более широким распространением беспроводных сенсорных сетей и необходимостью продления срока их жизни, которая определяется в основном рядом встроенного в сенсор источника питания. Целью работы является разработка метода балансировки энергетических характеристик сенсоров в беспроводной сети.

Базовый алгоритм кластеризации в подобных сетях не учитывает запас энергии каждого сенсора при выборе вершины кластера. В результате в качестве вершины кластера может быть выбран сенсор с недостаточными энергетическими характеристиками, что приведет к потере данных.

В то же время в сетях, регистрирующих некое событие, сенсоры находятся в неактивном состоянии до наступления события. Это позволяет использовать пакеты данных между базовой станцией и активными сенсорами для подзарядки источников питания наиболее разряженных сенсоров.

Поскольку в беспроводных сенсорных сетях пакеты данных могут принимать не только источник и приемник сигнала, то неактивные в данный момент сенсоры могут принимать и детектировать эти пакеты.

Беспроводной интерфейс за счет применения диапазона СВЧ 2,4 ГГц в случае наличия трафика в сети и близкого расположения принимающего сенсора от источника сигнала обеспечивает после детектирования достаточную мощность для эффективной подзарядки источников питания сенсоров. Эффективность детектирования в данном случае определяется согласованностью импеданса приемной антенны с входным контуром и потерями на детектирующих диодах.

¹ Работа выполнена при частичной финансовой поддержке по Гранту РФФИ №17-07-00689.

Предложенный в работе метод позволяет осуществлять балансировку энергетических параметров сенсоров в сети за счет энергии беспроводного диапазона. Данный подход отличает от известных аналогов не использование более сложных протоколов обмена, учитывающих энергетические характеристики каждого сенсора, а динамическую балансировку заряда источников питания сенсоров существенно продлевающую время жизни сети.

Беспроводные сенсорные сети (БСС) все шире проникают во все сферы современной жизни. Они используются для мониторинга технических систем и наблюдения за природными явлениями. Разработка методов и средств управления подобными сетями является наиболее перспективным направлением развития современных беспроводных технологий.

В общем случае БСС включает в себя набор сенсорных элементов (узлов) и одну (или несколько) базовую станцию, осуществляющую прием информации. В задачи сенсора входит не только регистрация одного или нескольких параметров среды, но и первичная обработка собранных данных, а также передача этих данных соседнему узлу или базовой станции.

Сенсоры в общем случае имеют в своем составе чувствительный элемент, блок первичной обработки данных и приемопередатчик. В зависимости от решаемых задач набор функциональных элементов может дополняться, но базовый набор блоков присутствует практически во всех современных БСС.

Сенсоры БСС, ориентированные на длительный мониторинг или рассчитанные на работу в агрессивной среде, как правило не предполагают замены встроенных источников питания. Таким образом, время работы от такого источника питания определяет время жизни БСС в целом.

В БСС, регистрирующих некое событие, для экономии энергии используются специализированные протоколы обмена, реализующие динамическую кластеризацию, при которой сенсоры переходят в активное состояние только после регистрации события. Далее формируется кластер из активных сенсоров и синтезируется дерево транзакций, позволяющее передать данные базовой станции с минимальными потерями энергии и с заданной надежностью.

В настоящее время разработано большое число подобных специализированных протоколов [1–4], позволяющих оптимизировать тот или иной набор параметров БСС. В то же время лишь немногие из этих протоколов используют информацию о энергетическом состоянии каждого сенсора, что может привести к потере данных, в случае если запаса энергии источника питания сенсора окажется недостаточно для установки связи с базовой станцией.

В данной работе предпринята попытка решения этой задачи за счет использования механизма динамической балансировки энергетических параметров с помощью детектирования энергии активных в данный момент сенсоров, передающих пакеты данных беспроводного интерфейса БСС базовой станции и соседним сенсорам.

Анализ расхода энергии элементами сенсорной сети

Типовое потребление энергии различными блоками сенсора представлено на рис. 1 [5]. На чувствительный элемент тратится около 4 % от суммарного энергопотребления. В то же время 90 % энергии расходуется на организацию радиосвязи с соседними узлами или базовой станцией в зависимости от используемого протокола обмена.

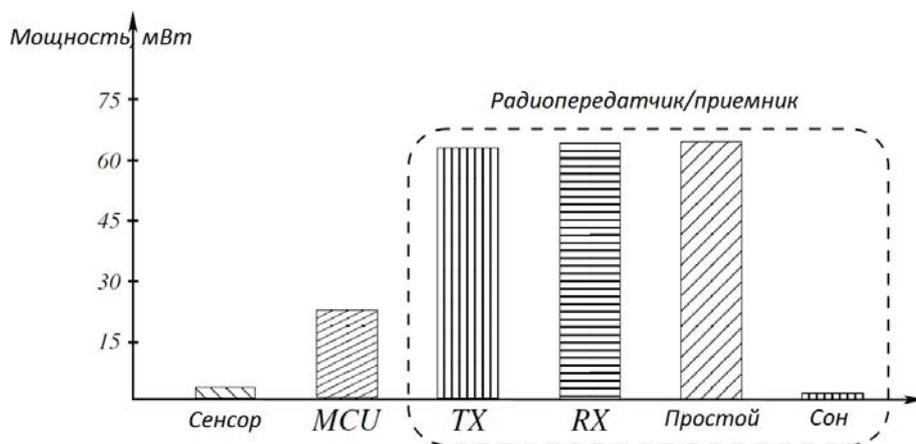


Рис. 1. Распределение потребления энергии сенсора [1]

Вместе с тем БСС в основном используются для регистрации неких событий, временные интервалы между которыми весьма значительны. В таком режиме сенсор до 99 % времени находится в неактивном состоянии, в котором функционирует только чувствительный элемент. В активное состояние сенсор переходит только при наступлении события, когда сигнал с чувствительного элемента превышает некоторое пороговое значение, либо по команде с базовой станции или от соседнего узла. Для таких БСС, ориентированных на регистрацию события, разработан целый класс протоколов организации информационного обмена, позволяющих минимизировать расходы энергии, сократить время доставки информации, повысить надежность передаваемых данных и контролировать перегрузку в сети [6–8].

С точки зрения энергоэффективности в БСС наибольший практический интерес представляют модификации базового протокола передачи данных – *Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy* (LEACH), который представляет собой TDMA-протокол с адаптивной кластеризацией [9]. Задача протокола – минимизация энергии, необходимой для создания и обслуживания динамически организуемых кластеров сенсоров. LEACH является иерархическим протоколом, в котором сенсоры передают данные вершине кластера, где происходит накопление и компрессия данных и далее их передача базовой станции. LEACH-протокол предполагает, что каждый сенсор имеет запас энергии достаточный для передачи данных непосредственно базовой станции или ближайшей вершине кластера.

Сенсоры, которые уже были вершиной кластера, не могут ей стать в течение P сеансов связи, где P – процент вершин кластеров, задаваемый пользователем. После этого каждый сенсор имеет вероятность $1/P$ стать вершиной кластера в течение данного сеанса связи. В конце каждого сеанса связи сенсоры, которые не были вершинами кластеров, выбирают новую вершину кластера, ближайшую к ним, и соединяются с ней. Вершина кластера затем готовит список транзакций для каждого сенсора, входящего в данный кластер.

LEACH является эффективным алгоритмом с точки зрения потребления энергии сети в целом, но в то же время LEACH не обеспечивает выбор сенсорного узла с достаточным запасом энергии в качестве вершины кластера. Поскольку в алгоритме LEACH не используется информация о текущем энергетическом состоянии сенсорного узла, то в качестве головного может быть выбран давно не избираемый член кластера с недостаточным запасом энергии, что приведет к потере данных. Таким образом балансировка запасов энергии между элементами кластера является важнейшей задачей, обеспечивающей надежность передаваемых данных.

Балансировка энергопотребления в сенсорной сети

Балансировка может осуществляться как за счет применения более сложных алгоритмов, учитывающих запас энергии каждого узла, так и за счет подзарядки источников питания наиболее разряженных узлов непосредственно от беспроводного интерфейса.

В неактивном состоянии приемная часть каждого узла, не участвующего в кластере, может принимать и накапливать энергию пакетов беспроводного интерфейса. При использовании диапазона на 2,4 ГГц и достаточно большом числе узлов, участвующих в обмене данными с базовой станцией и соседними узлами, энергии, принимаемой неактивными сенсорами, достаточно для эффективной подзарядки сенсора [10]. Накопление энергии может происходить на конденсаторе достаточно большой емкости (ионисторе), после разряда которого при переходе сенсора в активный режим происходит его переключение на основной непerezаряжаемый источник питания.

Рассмотрим вариант структурного построения системы накопления энергии сенсора, работающей в диапазонах беспроводной связи (рис. 2).

При работе в различных частотных диапазонах беспроводных интерфейсов изменяются только параметры входного контура. К выпрямителю предъявляются требования максимального выходного напряжения. Поэтому выпрямитель может быть реализован по схеме удвоителя напряжения на СВЧ-диодах Шоттки с минимальным прямым падением напряжения.

Основные потери энергии в данном случае обусловлены большим расстоянием между источником и приемником сигнала сети (обычно более 10 м), низким трафиком в сети и несогласованностью импеданса приемной антенны с входным контуром [11–15].

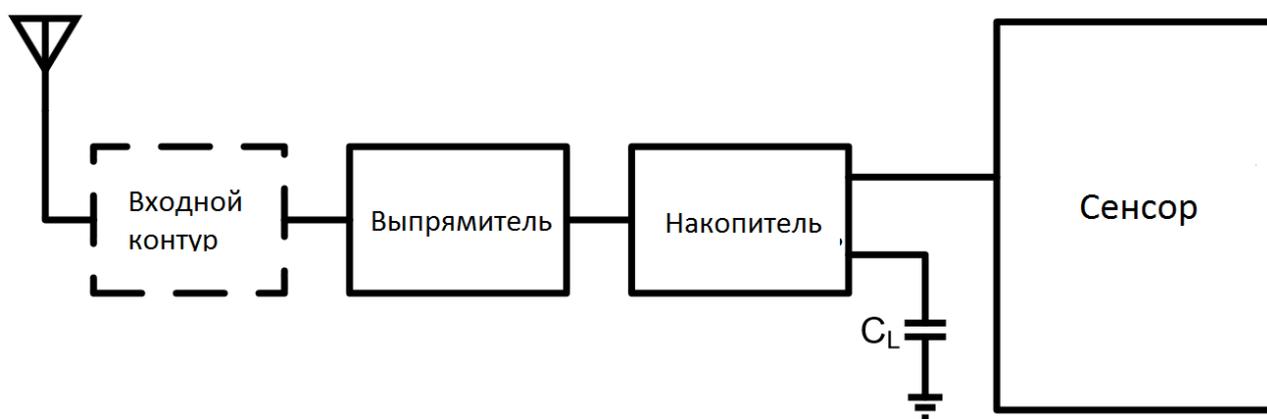


Рис. 2. Структурная схема источника энергии с приемником беспроводного интерфейса

При рассогласовании импеданса приемной антенны с входным контуром блока выпрямителя часть энергии будет теряться. Поэтому важнейшей задачей является точное согласование импеданса во всем диапазоне работы БСС.

На рис. 3 приведена зависимость потерь от частоты для типовой антенны сенсора, работающей в диапазоне Wi-Fi 2,4 ГГц. Как можно заметить, во всем диапазоне относительные потери не превышают 10дБ. Минимум потерь наблюдается в диапазоне 2,401–2,473 ГГц.

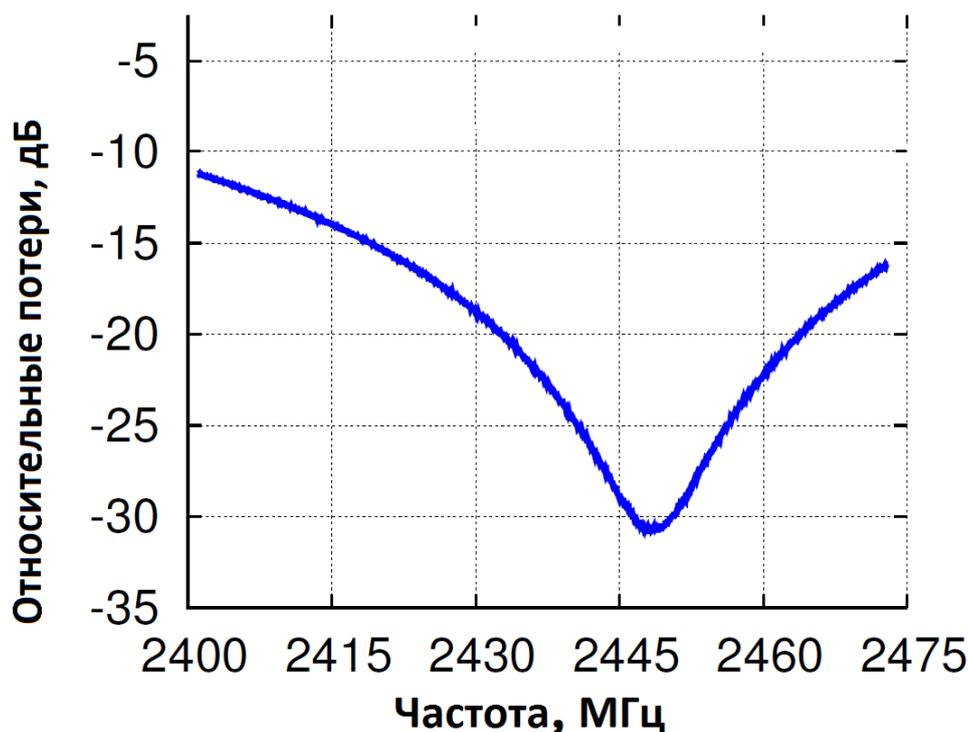


Рис. 3. Относительные потери во входном контуре

Мощность на выходе выпрямителя определяется потерями в выпрямителе и расстоянием от базовой станции. Потери в данном случае обусловлены наличием порогового падения напряжения на СВЧ-диодах. На рис. 4 показана выходная мощность на выпрямителе как функция от мощности радиосигнала при удалении от базовой станции. Результаты представлены для трех различных каналов Wi-Fi диапазона.

При максимальной мощности радиосигнала на выходе выпрямителя мощность достигает 100 мкВт для всех трех каналов. При увеличении расстояния до базовой станции и уменьшении мощности радиосигнала мощность на выходе выпрямителя падает экспоненциально до уровня менее 1 мкВт при мощности радиосигнала – 17 дБм.

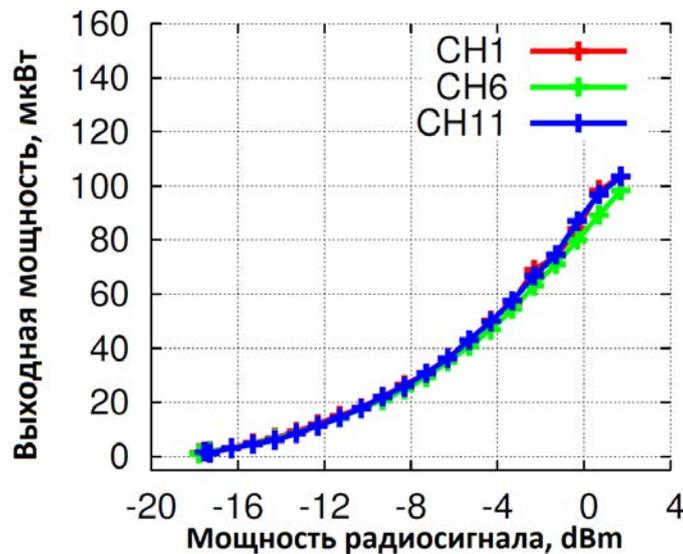


Рис. 4. Зависимость мощности на выходе выпрямителя в зависимости от мощности радиосигнала

Заключение

Использование при организации подсистемы питания сенсоров БСС энергии беспроводного интерфейса позволяет существенно увеличить время жизни сети и повысить ее надежность за счет перераспределения энергии между сенсорами. Такой подход особо эффективен для БСС, регистрирующих событие, когда 99 % времени сенсоры находятся в режиме ожидания. За время ожидания накопительный элемент сенсора может быть полностью заряжен при наличии интенсивного информационного обмена между близлежащими элементами БСС.

Библиографический список

1. *Akyildiz, F.* Wireless sensor networks: a survey / F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci // *Computer Networks*. – 2002. – № 38(4). – P. 393–422.
2. *Reshma, I.* Leach Protocol in Wireless Sensor Network: A Survey. Tandel, Shri S'adVidya / I. Reshma. – Gujarat, India : Mandal Institute of Technology, 2016. – P. 1894–1896.
3. *Taruna, S.* Event Driven Routing Protocols For Wireless Sensor Network / S. Taruna, M. R. Tiwari, S. Shringi // *International Journal on Computational Sciences & Applications (IJCSA)*. – 2013. – Vol. 3, № 2.
4. *Fodor, V.* Detecting low-power primary signals via distributed sensing to support opportunistic spectrum access / V. Fodor, I. Glaropoulos, L. Pescosolido // *Proceedings of IEEE ICC'09 (Dresden, Germany, June 2009)*. – 2009.
5. *VigilNet: an integrated sensor network system for energy-efficient surveillance* / T. He, S. Krishnamurthy, J. A. Stankovic, T. Abdelzaher, L. Luo, R. Stoleru, T. Yan, L. Gu, G. Zhou, J. Hui, B. Krogh // *ACM Transactions on Sensor Networks*. – 2006. – № 2 (1). – P. 38.
6. *Jaikao, C.* Diagnosis of sensor networks / C. Jaikao, C. Srisathapornphat, C. Shen // *In Proceedings of IEEE ICC'01 (Helsinki, Finland, June 2001)*. – 2001. – Vol. 5. – P. 1627–1632.
7. *Design and deployment of industrial sensor networks: experiences from a semiconductor plant and the North Sea* / L. Krishnamurthy, R. Adler, P. Buonadonna, J. Chhabra, M. Flanigan, N. Kushalnagar, L. Nachman, M. Yarvis // *Proceedings of SenSys'05*. – San Diego, CA, USA, 2005. – P. 64–75.
8. *Адамов, А. П.* Способ надежного питания элементов сенсорной сети от беспроводного интерфейса / А. П. Адамов, С. Г. Семенцов // *Надежность и качество сложных систем*. – 2018. – № 1 (21). – С. 79–83.
9. *Адамов, А. П.* Классификация состояний беспроводной сенсорной сети с использованием методов машинного обучения / А. П. Адамов, А. А. Адамова, М. Н. Юлдашев // *Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС)*. – 2016. – № 2. – С. 248–251.
10. *Власов, А. И.* Гауссовские процессы в регрессионном анализе состояний беспроводной сенсорной сети с учетом электромагнитных помех / А. И. Власов, М. Н. Юлдашев // *Технологии электромагнитной совместимости*. – 2017. – № 3 (62). – С. 35–43.
11. *Власов, А. И.* Анализ методов и средств обработки информации сенсорного кластера / А. И. Власов, М. Н. Юлдашев // *Датчики и системы*. – 2018. – № 1 (221). – С. 24–30.

12. Адамов, А. П. Методы обеспечения надежности в беспроводных сенсорных сетях по критерию сетевой нагрузки / А. П. Адамов, А. А. Адамова, М. Н. Юлдашев // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2016. – Т. 1. – С. 197–199.
13. Власов, А. И. Визуальные модели синтеза эффективных энергосистем / А. И. Власов // Энергосбережение и эффективность в технических системах : материалы V Междунар. науч.-техн. конф. студентов, молодых ученых и специалистов. – М., 2018. – С. 90–92.
14. Отчет по НИР № 17-07-00689. Исследование методов синтеза распределенных сенсорных систем по критерию минимизации сетевой нагрузки / А. А. Адамова, А. Н. Алфимцев, А. И. Власов, С. Г. Семенцов, Т. А. Цивинская, М. Н. Юлдашев. – М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2017. – 75 с.

References

1. Akyildiz F., Su W., Sankarasubramaniam Y., Cayirci E. *Computer Networks*. 2002, 38 (4), pp. 393–422.
2. Reshma I. *Leach Protocol in Wireless Sensor Network: A Survey*. Tandel, Shri S'adVidya. Mandal Institute of Technology. 2016, pp. 1894–1896.
3. Taruna S., Tiwari Megha R., Shringi S. *International Journal on Computational Sciences & Applications (IJCSA)*. 2013, vol. 3, no. 2.
4. Fodor V., Glaropoulos I., Pescosolido L. *Proceedings of IEEE ICC'09 (Dresden, Germany, June 2009)*. 2009.
5. He T., Krishnamurthy S., Stankovic J. A., Abdelzaher T., Luo L., Stoleru R., Yan T., Gu L., Zhou G., Hui J., Krogh B. *ACM Transactions on Sensor Networks*. 2006, no. 2 (1), p. 38.
6. Jaikao C., Srisathapornphat C., Shen C. *In Proceedings of IEEE ICC'01 (Helsinki, Finland, June 2001)*. 2001, vol. 5, pp. 1627–1632.
7. Krishnamurthy L., Adler R., Buonadonna P., Chhabra J., Flanigan M., Kushalnagar N., Nachman L., Yarvis M. *Proceedings of SenSys'05 (San Diego, CA, USA, 2005)*. 2005, pp. 64–75.
8. Adamov A. P., Sementsov S. G. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2018, no. 1 (21), pp. 79–83.
9. Adamov A. P., Adamova A. A., Yuldashev M. N. *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nano-elektronnykh sistem (MES)* [Problems of development of perspective micro-and nanoelectronic systems (MES)]. 2016, no. 2, pp. 248–251.
10. Vlasov A. I., Yuldashev M. N. *Tekhnologii elektromagnitnoy sovместимости* [Electromagnetic compatibility technologies]. 2017, no. 3 (62), pp. 35–43.
11. Vlasov A. I., Yuldashev M. N. *Datchiki i sistemy* [Sensors & systems]. 2018, no. 1 (221), pp. 24–30.
12. Adamov A. P., Adamova A. A., Yuldashev M. N. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2016, vol. 1, pp. 197–199.
13. Vlasov A. I. *Energoberezhenie i effektivnost' v tekhnicheskikh sistemakh: materialy V Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. studentov, molodykh uchenykh i spetsialistov* [Energy saving and efficiency in technical systems: materials V international. scientific.- techn. Conf. students, young scientists and specialists]. 2018, pp. 90–92.
14. Adamova A. A., Alfimtsev A. N., Vlasov A. I., Sementsov S. G., Tsivinskaya T. A., Yuldashev M. N. *Otchet po NIR № 17-07-00689. Issledovanie metodov sinteza raspredelennykh sensorykh sistem po kriteriyu minimizatsii setevoy nagruzki* [Report on research № 17-07-00689. Study of methods of synthesis of distributed sensor systems by the criterion of minimizing the network load]. Moscow: MGTU im. N. E. Baumana, 2017. – 75 p.

Адамов Александр Петрович

доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РД,
кафедра микроэлектроники,
Дагестанский государственный
технический университет
(367026, Дагестан, г. Махачкала, ул. И. Шамиля, 70)
E-mail: info@iu4.bmstu.ru

Семенцов Станислав Григорьевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра проектирования и технологии
производства электронной аппаратуры,
Московский государственный технический
университет им. Н. Э. Баумана
(105005 Россия, г. Москва, 2-ая Бауманская 5, стр. 1)
E-mail: siemens_off@mail.ru

Adamov Aleksandr Petrovich

doctor of technical sciences, professor,
honored worker of science RD,
sub-department of microelectronics,
Dagestan State Technical University
(367026, 70 I. Shamil street, Makhachkala, Dagestan)

Sementsov Stanislav Grigorievich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of design and production technology
of electronic equipment,
Bauman Moscow State Technical University
(105005, p. 1, 5 2nd Baumanskaya street,
Moscow, Russia)

Темиров Алибулат Темирбекович

кандидат технических наук, доцент,
декан факультета радиоэлектроники,
телекоммуникаций и мультимедийных технологий,
Дагестанский государственный
технический университет
(367026, Дагестан, г. Махачкала, ул. И. Шамиля, 70)
E-mail: ali.temirov@rambler.ru

Temirov Alibulat Temirbekovich

candidate of technical sciences, associate professor,
dean of the faculty of radio electronics,
telecommunications and multimedia technologies,
Dagestan State Technical University
(367026, 70 I. Shamil street, Makhachkala, Dagestan)

УДК 621.316.1.681.586:003.13

Адамов, А. П.

Балансировка энергетических характеристик сенсоров в беспроводных сенсорных сетях /

А. П. Адамов, С. Г. Семенцов, А. Т. Темиров // Надежность и качество сложных систем. – 2018. –
№ 3 (23). – С. 98–104. – DOI 10.21685/2307-4205-2018-3-12.

ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

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

УДК 621.828

DOI 10.21685/2307-4205-2018-3-13

А. В. Ключников, М. А. Васильев, Н. Е. Патокина, Н. А. Абышев, Д. А. Криковцов

КОНСТРУКЦИИ И ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ ХАРАКТЕРИСТИК ГЕОМЕТРИИ МАСС ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

A. V. Klyuchnikov, M. A. Vasil'ev, N. E. Patokina, N. A. Abyshv, D. A. Krikovtsov

STRUCTURES AND ENHANSMENT PROSPECTS FOR CONTROL SYSTEMS OF THE AIRCRAFTS MASS GEOMETRY CHARACTERISTICS

Аннотация. Экспериментальный контроль массо-геометрических характеристик на заключительном этапе общей сборки летательных аппаратов проводится с использованием специализированных контрольно-измерительных стендов, учитывающих конструктивные особенности аппаратов. При определении координат центра масс в настоящее время обычно используют стенды, реализующие весовой метод измерений, а моменты инерции определяют на стендах, работающих по принципу физического или крутильного маятника. При этом технология выполнения измерений требует многократных переустановок контролируемого аппарата на используемых стендах. Низкие характеристики точности и производительности стендового оборудования обоих типов препятствуют повышению точности контроля массо-геометрических характеристик и делают актуальной задачу совершенствования конструктивного исполнения стендового оборудования и методического обеспечения измерений указанных характеристик с целью снижения продолжительности экспериментальных работ и повышения точности определения указанных характеристик. В работе рассмотрены конструкции

Abstract. Mass-geometry characteristics at a final stage of the aggregate assembly of flying vehicles are experimentally verified with special control stands, taking into account design features of the vehicles. When defining the center-mass position today weight-based measurement stands are usually used, whereas inertia moments are being defined with use of physical or torsion pendulum-based stands. Measurement process requires here multiple displacement of the item under control through operated stands. Poor accuracy and low performance of both types stand equipment hinders in enhancement of control over mass-geometry characteristics, actualizing upgrading of both design of the stand equipment and methodical support of the above characteristics measurement to reduce the time of the experiments and to raise exactness in defining of the same characteristics. The work discusses design of stands based on swinging stage mode enabling establishing of both mass center coordinates and inertia moments after the device was put on the measuring unit of the stand, and on the mode of dynamic balancing for precision defining of mass-inertia asymmetry of devices. Specifications of the stands are adduced.

стендов, реализующих метод качающейся платформы, обеспечивающий определение координат центра масс и моментов инерции при однократной установке аппарата на измерительное устройство стенда, и метод динамической балансировки – для прецизионного определения параметров массо-инерционной асимметрии аппаратов. Приведены технические характеристики стендов.

Ключевые слова: тело вращения, летательный аппарат, центр масс, ось инерции, момент инерции, ось симметрии, период колебаний, частота вращения, балансировочный расчет.

Key words: body of revolution, flying vehicle, centre mass, inertia axis, inertia moment, symmetry axis, vibration cycle, rotation frequency, balancing analysis.

Введение

При компоновке и изготовлении летательного аппарата (ЛА), как правило, возникает задача точно определить его массо-геометрические характеристики (МГХ) – массу, координаты центра масс и моменты инерции, в значительной степени влияющих на летно-технические характеристики аппарата. Стремление к повышению эффективности эксплуатации и снижению вероятности появления аномальных режимов полета высокоскоростных ЛА требует качественного уравнивания аппарата после изготовления и сборки с обеспечением заданных нормативов статической и моментной балансировки [1]. К числу параметров, характеризующих статическую и моментную неуравновешенность аппарата или асимметричность распределения масс относительно оси симметрии его наружной поверхности, обычно принимаемой в качестве строительной оси, относят величину смещения центра масс и угол отклонения продольной главной центральной оси инерции (ГЦОИ) относительно указанной оси. Близость к нулю номинальных значений данных параметров, называемых также параметрами массо-инерционной асимметрии, определяет трудности процесса их измерения и приведения к заданным в эксплуатационной документации на аппарат нормативам.

Постановка задачи

В настоящее время точность теоретического расчета значений МГХ, обычно выполняемого на этапе проектирования ЛА с использованием расчетных характеристик элементов снаряжения (таких как масса, моменты инерции, координаты установки компоновемых внутри корпуса аппарата полезных грузов, датчиковой аппаратуры, приборов и исполнительных механизмов), составляет от 5 % до 20 % и более от их фактических значений [2]. Одной из причин появления отклонений фактических характеристик от расчетных значений может являться наличие случайных погрешностей характеристик элементов снаряжения, неизбежно возникающих на стадиях изготовления и сборки ЛА. Очевидно, что повышение требований к точности компоновки ЛА по результатам теоретического расчета МГХ до десятых и сотых долей процента, что необходимо в ряде ответственных применений, потребовало бы применения дополнительного многочисленного прецизионного контрольно-измерительного оборудования. При современном уровне развития техники и технологии такой подход приводит к столь значительному удорожанию производства, что делает изготовление аппаратов практически невозможным. Поэтому для определения МГХ на заключительном этапе общей сборки аппарата обычно применяют экспериментальные или расчетно-экспериментальные методы. На практике массу ЛА зачастую определяют путем взвешивания на стандартных весах, обеспечивая погрешность измерений не хуже 0,03 % от массы аппарата. Остальные МГХ, требования к которым весьма специфичны, традиционно выполняют с применением специализированных контрольно-измерительных стендов, учитывающих конструктивные особенности контролируемых объектов (например, значительные размеры по длине и диаметру, форму корпуса, наличие оперения, отсутствие удобной технологической базы для закрепления на рабочем органе стенда, наличие (для аппаратов, например, с конической формой корпуса) единственной плоскости коррекции, конструктивно расположенной на значительном расстоянии от центра масс аппарата и др.) и обеспечивающих безопасность проводимых работ. В работах [2–4] приведен анализ методик балансировки ЛА. Для определения координат центра масс в настоящее время по-прежнему используются главным

образом стенды, реализующие методы двух или трех весов, а моменты инерции определяют на стендах, реализующих метод физического маятника или метод крутильных колебаний. В частности, для определения моментов инерции высокоскоростных ЛА, выполненных в виде тела вращения, например, гладкостенного модуля конической формы с малым полууглом раствора, наибольшее применение получил метод перевернутого унифиляра благодаря удобству размещения аппарата на измерительном столе стенда и удобству доступа к штатной плоскости коррекции [2, 3, 5]. Последующий расчет параметров массо-инерционной асимметрии выполняется по специальным методикам, с использованием результатов определения МГХ на контрольно-измерительных стендах. А балансировку с приведением указанных параметров к значениям, не превышающим заданных в эксплуатационной документации на аппарат предельно-допустимых значений, выполняют путем корректировки его массы с помощью балансировочных грузов, устанавливаемых на штатную плоскость коррекции. Однако унифилярные стенды, как правило, не пригодны для контроля МГХ длинномерных ЛА и ЛА с развитым оперением корпуса. Необходимость перевода в вертикальное положение в процессе выполнения измерений может накладывать ограничения на длину контролируемого ЛА, а наличие оперения корпуса зачастую требует использования сложной и дорогой в изготовлении технологической оснастки, обеспечивающей базирование аппарата в измерительном устройстве стенда и его перевод в требуемые пространственно-угловые положения.

Одним из ведущих зарубежных производителей подобного контрольно-измерительного оборудования с начала 60-х гг. прошлого века является фирма «Carl Schenck» (ФРГ), поставляющая на рынок одноосные весы, колебательные столы и балансировочные машины. С 70-х гг. разработка аналогичного стендового оборудования для экспериментального определения МГХ ЛА проводится «НПО «Техномаш», РФЯЦ-ВНИИТФ, ЭНИМС и рядом других отечественных предприятий. Достигнутая инструментальная точность лучших образцов указанного оборудования позволяет определять поперечные координаты центра масс и угол перекаса продольной ГЦОИ относительно геометрической оси аппарата с погрешностью от 0,05 до 0,1 мм и до нескольких угловых минут соответственно [2]. Как показал опыт эксплуатации, препятствием к значительному повышению точности определения МГХ, например, с использованием известного метода многократных измерений, и последующему обеспечению требуемых нормативов статической и моментной балансировки ЛА на стендах (как отечественного, так и зарубежного производства) является их высокая трудоемкость и низкая производительность. Необходимость выполнения многократных переустановок объекта на измерительные устройства различных стендов в процессе балансировки приводит к появлению дополнительной методической погрешности, что нередко нивелирует эффект повышения точности, полученный в результате многократных измерений параметров. Опасения, что эффект от установки корректирующей массы в плоскости коррекции (единственной, расположенной на значительном расстоянии от центра масс ЛА), выполняемой для устранения статической неуравновешенности, приведет к увеличению моментной неуравновешенности аппарата, зачастую заставляет балансировщиков принимать половинчатые решения, увеличивая при этом число шагов балансировки, что, в свою очередь, приводит к кратному увеличению времени балансировки. На практике процесс определения МГХ лишь одного ЛА на указанных стендах может продолжаться или даже превышать одну рабочую смену, а процесс приведения параметров массо-инерционной асимметрии к заданным нормативам может продолжаться в течение нескольких суток. Приведенные выше обстоятельства делают актуальной задачу дальнейшего совершенствования контрольно-измерительного оборудования, предназначенного для определения и обеспечения МГХ летательных аппаратов.

В настоящее время наметились два направления разработки и совершенствования методов и средств балансировки ЛА. Одним из таких направлений является разработка универсальных контрольно-измерительных стендов, позволяющих определять весь комплекс МГХ с одной установки объекта контроля на измерительное устройство стенда, что позволяет сократить время балансировочного эксперимента, а также снизить «уязвимость» стендов к изменениям габаритов, формы и степени оперенности корпуса. Другим направлением является разработка стендов для прецизионной балансировки высокоскоростных ЛА, например, с использованием методов динамической балансировки, которые позволяют с высокой точностью выполнять измерения параметров массо-инерционной асимметрии объекта контроля относительно оси симметрии его наружной поверхности при совмещении ее с имеющейся на стенде осью вращения. Также привлекательным является высокая производительность балансировочного оборудования в каждом пуске. Обычно с учетом

разгона и торможения объекта контроля продолжительность одного измерительного цикла на динамическом балансировочном стенде составляет несколько минут, а всего балансировочного эксперимента – не превышает 1–2 часов времени [6].

Практическая реализация

Для определения координат центра масс и моментов инерции длинномерных ЛА, в том числе с развитым оперением корпуса, спроектирован и изготовлен (свидетельство об утверждении типа средств измерений № 58133) контрольно-измерительный стенд, реализующий метод качающейся платформы (астатического маятника) [7, 8].

Кинематическая схема механической установки стенда в соответствии с рис. 1 выполнена в виде качающейся платформы, на которой установлен позиционер с ложементами для закрепления объекта контроля. В ходе эксперимента позиционер обеспечивает базирование ЛА в ложементах по базовым поверхностям, имеющимся на корпусе, и перевод аппарата в заданные фиксированные пространственно-угловые положения в горизонтальной плоскости. При этом имеется возможность поворота ЛА относительно оси качания под углами 0 , $\pm 45^\circ$ и $\pm 90^\circ$, а также вокруг продольной оси на углы 0 , 45° и 90° . Выполнение маятниковых колебаний платформы с позиционером в вертикальной плоскости обеспечивается при помощи рычага и упругого элемента – пружины. В конструкции стенда также имеется пневматическое устройство, позволяющее отклонить подвижную часть механической установки с размещенным на ней объектом контроля от положения равновесия на определенный угол (порядка 3 градусов), зафиксировать ее в этом положении и затем освободить, запустив процесс маятниковых колебаний платформы в вертикальной плоскости, а также остановить колебания. Измерения периодов колебаний выполняют с помощью оптоволоконного фотодатчика, чувствительный элемент которого (не показан) закреплен на шарнире оси колебаний. Стенд оснащен набором сменных ложементов с соответствующей формой посадочных поверхностей для установки и контроля МГХ объектов, имеющих как цилиндрическую, так и коническую форму корпуса.

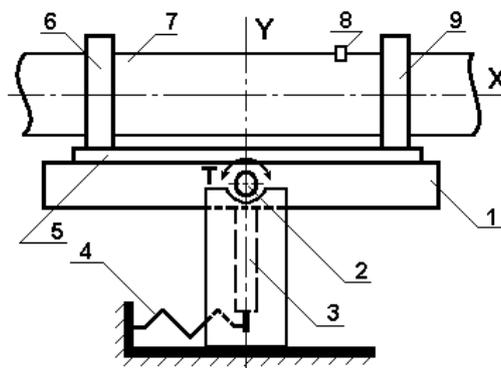


Рис. 1. Схема механической установки стенда с качающейся платформой:

1 – платформа; 2 – шарнир; 3 – рычаг; 4 – пружина; 5 – позиционер;
6 – задний ложемент; 7 – объект контроля; 8 – передний бугель; 9 – передний ложемент

Определение моментов инерции относительно шести пространственно распределенных осей, а также поперечных координат центра масс основано на принципе измерений периодов колебаний T качающейся вокруг горизонтальной оси механической системы. Измерения периодов колебаний для каждого пространственно-углового положения позиционера выполняют дважды – сначала для механической системы, включающей в себя платформу, позиционер и контролируемый аппарат, а затем – для механической системы, состоящей только из платформы и позиционера. Моменты инерции и поперечные координаты центра масс ЛА рассчитывают как разность между результатами измерений этих характеристик, полученными для обеих рассмотренных механических систем с учетом геометрических размеров и пространственно-угловой ориентацией технологической оснастки [7].

Определение продольной координаты центра масс основано на принципе статического уравновешивания. Уравновешивание платформы с установленным на ней в позиционере аппаратом выполняют относительно оси качания на предварительно выставленном горизонтально позиционере с помощью грузов известной массы, прикрепляемых к платформе на известном расстоянии от оси

качания. Сначала вычисляют положение центра масс аппарата относительно оси качания, а затем рассчитывают положение центра масс относительно носка, используя заранее известные расстояния между носком аппарата, его передним бугелем, стенкой переднего ложеента и осью качания.

В табл. 1 приведены технические характеристики стенда, полученные с использованием аттестованного эталона [7, 9]. Достигнутые показатели точности определения МГХ позволяют определять величину поперечного смещения центра масс и угла перекоса продольной ГЦОИ ЛА относительно его оси симметрии соответственно с погрешностями ~0,15 мм и ~10 угловых минут.

Таблица 1

Технические характеристики стенда с качающейся платформой

Название параметра	Значение параметра
Предельная масса контролируемого объекта, кг	1600
Относительная погрешность определения осевых моментов инерции, %	2
Максимальная погрешность определения продольной координаты центра масс, мм	0,7
Максимальная погрешность определения поперечных координат центра масс, мм	0,1
Среднее время выполнения 1 цикла измерений МГХ, ч	4

Конструкция рассмотренного стенда, реализующего метод астатического маятника, обеспечивает определение комплекса МГХ длинномерных массивных ЛА, в том числе с оперенным корпусом, с одной установки контролируемого аппарата на стенде. Это приводит к существенному сокращению времени балансировки по сравнению с методикой, требующей последовательного применения двух различных стендов для определения координат центра масс и моментов инерции. Все измерения выполняются исключительно при горизонтальном положении аппарата на стенде, что снимает ограничения по высоте помещения, в котором проводятся измерения. Изменение формы корпуса ЛА требует использования в конструкции позиционера соответствующих ложементов, обеспечивающих установку ЛА по базовым поверхностям. Обычно процесс определения МГХ и приведения параметров массо-инерционной асимметрии к заданным в эксплуатационной документации на контролируемый аппарат нормативам составляет до 3 – 4 рабочих смен. Число шагов балансировки не ограничено. Препятствием к существенному повышению точности определения и обеспечения параметров массо-инерционной асимметрии, например, с использованием известного метода многократных измерений, является низкая производительность стенда, а также необходимость применения итерационного подхода при расчете корректирующих масс.

Для прецизионной балансировки конических ЛА, в процессе эксплуатации стабилизируемых вращением вокруг оси симметрии своей наружной поверхности, спроектирован и изготовлен (свидетельство об утверждении типа средств измерений № 35121) динамический балансировочный стенд с вертикальной осью вращения и жесткими опорами, выполненными в виде конических газостатических подшипников. На рис. 2 приведена кинематическая схема стенда [10–12].

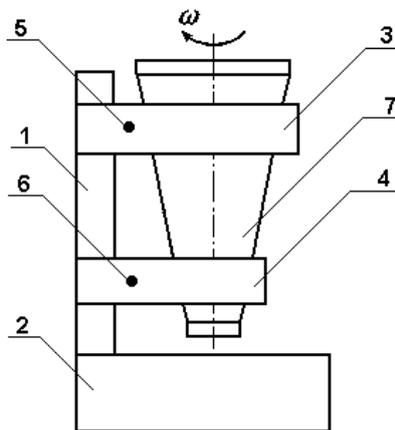


Рис. 2. Кинематическая схема балансировочного стенда:

1 – вертикальная стойка; 2 – фундамент; 3 – верхняя колебательная подвеска; 4 – нижняя колебательная подвеска; 5 – верхний датчик силы; 6 – нижний датчик силы; 7 – технологический переходник

На вертикальной стойке, установленной на мощном фундаменте, консольно закреплены верхняя и нижняя колебательные подвески, каждая из которых представляет собой пару плоскопараллельных пластин, удерживающих конические газостатические подшипники. В упругих элементах колебательных подвесок установлены пьезоэлектрические датчики силы, измеряющие реакции опор на проявления динамической неуравновешенности вращающегося в опорах сборного ротора. Сборный ротор образуется в результате установки (торцом вверх) внутри защитного технологического переходника, загруженного на стенд, объекта контроля (не показан). Переходник имеет форму усеченного конуса и выполнен в виде полого сбалансированного ротора, наружная боковая поверхность которого соответствует рабочим поверхностям газостатических подшипников, а внутренняя – базовым посадочным поверхностям контролируемого ЛА. Переходник обеспечивает физическую сохранность наружной поверхности аппарата, а также материализует вторую плоскость коррекции, выполненную на нижнем торце переходника (при этом в качестве первой плоскости коррекции используют штатную плоскость коррекции, конструктивно располагаемую вблизи торца ЛА). Для контроля частоты вращения сборного ротора, а также в качестве отметчика фазы дисбалансов используется фотоэлектрический световодный датчик оборотов (не показан).

Все измерения выполняют на постоянной рабочей частоте вращения ω . Настройку стенда выполняют в процессе балансировочного эксперимента с использованием пробных грузов известной массы, поочередно устанавливаемых в каждой из двух плоскостей коррекции в известных угловых положениях. При этом в качестве верхней используется штатная плоскость коррекции ЛА, а в качестве нижней – нижний торец переходника [10]. Для исключения влияния дисбалансов переходника измерения вибраций опор сборного ротора в исходном состоянии выполняют дважды – для двух взаимно противоположных угловых положений ЛА относительно технологического переходника, с последующим усреднением результатов измерений. Измерения вибраций опор в каждом пуске выполняют на постоянной частоте вращения сборного ротора. По результатам измерений определяют параметры (значение и угловое положение) векторов дисбалансов, действующих в плоскостях коррекции, и рассчитывают параметры начальной массо-инерционной асимметрии ЛА [13, 14]. При этом масса, расстояния от центра масс до плоскостей коррекции, а также моменты инерции аппарата должны быть заранее определены на другом оборудовании и с использованием других средств измерений.

Последующий расчет массы и углового положения балансировочного груза в штатной плоскости коррекции ЛА выполняют в случае, если значение хотя бы одного из начальных параметров массо-инерционной асимметрии превышает соответствующее предельно-допустимое значение. Расчет проводят с оптимизацией по критерию достижения минимального значения одним из контролируемых параметров. На практике, при проведении расчетов балансировщики стремятся достичь минимально возможного смещения центра масс с оси симметрии контролируемого аппарата при одновременном обеспечении заданного норматива по углу перекоса продольной ГЦОИ относительно той же оси [14]. В случае если расчетным путем показана невозможность приведения обоих параметров массо-инерционной асимметрии к значениям, не превышающим предельно-допустимых значений, контролируемый аппарат бракуют и направляют на перекомпоновку, исключая выполнение заведомо бесперспективных шагов балансировки.

Погрешности измерений поперечного смещения центра масс и угла перекоса продольной ГЦОИ, достигнутые при проведении метрологических испытаний рассмотренного динамического балансировочного стенда с использованием массо-габаритных макетов ЛА, не превысили соответственно 0,01 мм и 1 угловой минуты [15, 16]. Грузоподъемность стенда составляет 500 кг. Весь процесс балансировки ЛА в динамическом режиме, включая операции по экспериментальной настройке стенда на конкретный ЛА, выполнению измерений начальных параметров массо-инерционной асимметрии, их приведения к заданным нормативам с последующим экспериментальным подтверждением достигнутых значений параметров остаточной массо-инерционной асимметрии, как правило, не превышает 1,5 часов рабочего времени, а число шагов балансировки сокращается до одного шага.

Заключение

Применение контрольно-измерительного стенда, реализующего метод астатического маятника, позволяет определять весь комплекс МГХ (кроме массы, а в перспективе, возможно, и включая массу) летательных аппаратов с различной формой корпуса и степенью оперения, в том числе обладающего

значительными массой и габаритами по длине и диаметру, с одной установки аппарата на измерительное устройство и при горизонтальном расположении аппарата на стенде, что позволяет сократить общую продолжительность работы. Применение динамического балансировочного стенда обеспечивает значительное повышение точности определения параметров массо-инерционной асимметрии конических ЛА, приводит к сокращению продолжительности балансировочного эксперимента.

Рассмотренные контрольно-измерительные стенды компьютеризированы и представляют собой современные автоматизированные системы контроля с удобным операторским интерфейсом, обеспечивающие получение и обработку данных непосредственно в месте проведения испытаний [11, 17]. Технические решения, использованные при разработке стендов, защищены патентами [8, 12, 18]. Стенды сертифицированы и внесены в Госреестр средств измерений РФ.

Перспективным направлением совершенствования технологии контроля МГХ гладкостенных ЛА является сочетание методов маятниковых колебаний и динамической балансировки с объединением рассмотренных контрольно-измерительных стендов в единую систему и использованием последовательной методики определения МГХ и прецизионного приведения параметров массо-инерционной асимметрии к заданным нормативам на заключительном этапе общей сборки аппарата, что позволит сократить продолжительность балансировочного эксперимента до одной рабочей смены. В этом случае на маятниковом стенде может проводиться предварительное определение положения центра масс и моментов инерции аппарата (с целью получения исходных данных для проведения в последующем балансировочного расчета), а окончательная балансировка аппарата будет осуществляться на динамическом балансировочном стенде. Можно отметить, что дублирование и сличение результатов измерений параметров массо-инерционной асимметрии, полученных на разном оборудовании, с использованием разных способов измерений, повышает достоверность и надежность результатов балансировки контролируемого летательного аппарата.

Библиографический список

1. *Дмитриевский, А. А.* Внешняя баллистика / А. А. Дмитриевский, Л. Н. Лысенко, С. С. Богодистов. – М. : Машиностроение, 1991. – 640 с.
2. *Матвеев, Е. В.* Оборудование для определения характеристик геометрии масс и массы космических летательных аппаратов / Е. В. Матвеев, В. В. Крылов, Е. В. Кочкин // Научно-технические достижения. – 1992. – № 5. – С. 40–44.
3. *Матвеев, Е. В.* Направления развития технологий и оборудования для измерений инерционных характеристик изделий РКТ / Е. В. Матвеев // Новые технологии : тр. Всерос. науч.-техн. конф. – М. : РАН, 2012. – Т. 1. – С. 44–52.
4. *Миронов, А. Д.* Методы исследований на летающих моделях / А. Д. Миронов, Г. П. Владычин, А. А. Кондратьев, Н. К. Ханов, В. Н. Бызов, А. Д. Мронов. – М. : Машиностроение, 1988. – 144 с.
5. А. с. №1046633 СССР МКИ³ G 01 M 1/10. Способ определения центрального момента инерции и координат центра масс в заданной плоскости и массы тела / Г. Г. Смирнов // Открытия. Изобретения. – Заявл. 12.03.82; опубл. 07.10.83. – № 37.
6. *Ключников, А. В.* Перспективы использования балансировочного оборудования в задаче контроля характеристик массо-инерционной асимметрии БПЛА / А. В. Ключников // Научные чтения по авиации, посвящ. памяти Н. Е. Жуковского : тр. Всерос. науч.-техн. конф. – М. : Изд. дом Академии имени Н. Е. Жуковского, 2016. – С. 67–71.
7. *Абышев, Н. А.* Стенд для комплексного определения массо-геометрических характеристик деталей методом качающейся платформы / Н. А. Абышев, М. А. Васильев, А. В. Ключников, Д. А. Криковцов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2015. – Т. 1. – С. 320–321.
8. Пат. № 2596032 РФ МПК G 01 M 1/10. Способ определения тензора инерции изделия и стенд для его реализации / Васильев М. А., Комаров В. И., Коньков М. Н., Сафронов И. Н. – Заявл. 05.12.14 ; опубл. 27.08.16 ; Бюл. № 24.
9. Автоматизация измерений характеристик геометрии масс летающей модели на стенде, реализующем метод астатического маятника / Н. А. Абышев, М. А. Васильев, А. В. Ключников, Д. А. Криковцов, С. А. Терехова, Л. Д. Цынгueva // Труды Междунар. науч.-практ. конф. Инновационные, информационные и коммуникационные технологии. – М. : Изд. дом Академии имени Н. Е. Жуковского, 2016. – С. 265–268.
10. *Абышев, Н. А.* Стенд для прецизионной бесконтактной балансировки конических роторов в динамическом режиме / Н. А. Абышев, А. В. Ключников, Е. Ф. Михайлов, М. С. Чертков // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2014. – Т. 2. – С. 234–236.
11. *Абышев, Н. А.* Конструктивные особенности стенда для диагностики характеристик асимметрии масс летательных аппаратов / Н. А. Абышев, С. В. Андреев, А. В. Ключников // Авиакосмическое приборостроение. – 2015. – № 1. – С. 39–45.

12. Пат. № 2292533 РФ МПК G 01 M 1/02. Балансировочный стенд с вертикальной осью вращения / Глазырина Л. М., Карповицкий М. С., Ключников А. В., Мальгин А. И., Смирнов Г. Г., Фомин Ю. П. – Заявл. 27.04.2004 ; опубл. 27.01.2007 ; Бюл. № 3.
13. Ключников, А. В. Уточненная математическая модель оценки и обеспечения параметров массоинерционной асимметрии длинномерного роторного модуля / А.В. Ключников // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2012. – Т. 1. – С. 224–227.
14. Ключников, А. В. Развитие и совершенствование алгоритма одноплоскостной балансировки в динамическом режиме высокоскоростной летающей модели / А. В. Ключников // Вестник СибГАУ. – 2015. – Т. 16, № 2. – С. 411–416.
15. Ключников, А. В. Способ контроля качества функционирования стенда для определения характеристик асимметрии масс осесимметричных роторов / А. В. Ключников // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2010. – Т. 2. – С. 12–14.
16. Ключников, А. В. Метрологические аспекты модели уравнивания летательного аппарата на динамическом балансировочном стенде / А. В. Ключников, А. В. Лысых, М. С. Чертков // Вестник Концерна ПВО «Алмаз-Антей». – 2015. – № 1. – С. 43–48.
17. Ключников, А. В. Принципы построения и структура системы диагностики асимметричности в распределении масс летательного аппарата / А. В. Ключников, М. Д. Шагимуратов // Научно-технический вестник Поволжья. – 2015. – № 2. – С. 141–143
18. Пат. РФ №2499985 РФ МПК G 01 M 11/16. Способ балансировки ротора в одной плоскости коррекции / Ключников А. В. – Заявл. 11.04.2012 ; опубл. 27.11.2013 ; Бюл. № 33.

References

1. Dmitrievsky A. A., Lysenko L. N., Bogodistov S. S. *Vneshnyaya ballistika* [External ballistics]. Moscow: Mashinostroenie, 1991, p. 640
2. Matveev E. V., Krylov V. V., Kochkin E. V. *Nauchno-tekhnicheskie dostizheniya* [Scientific and technical achievements]. 1992, no. 5, pp. 40–44.
3. Matveev E. V. *Trudy Vseros. nauch.-tekhn. konf. Novye tekhnologii* [Works of All-Russia scientific and technical conf. New technologies]. Moscow: RAS, 2012, vol. 1, pp. 44–52.
4. Mironov A. D., Vladychin G. P., Kondratiev A. A. et al. *Metody issledovaniy na letayushchih modelyah* [Research methods on flying models]. Moscow: Mashinostroenie, 1988, 144 p.
5. Smirnov G. G. A. p. No. 1046633 USSR MKI3 G 01 M 1/10. *Sposob opredeleniya central'nogo momenta inercii i koordinat centra mass v zadannoj plos-kosti i massy tela* [The method of determining the central moment of inertia and the coordinates of the center of mass in a given plane and body mass]. Discoveries. Inventions. Appl. 03/12/82; publ. 10/07/83, no. 37.
6. Klyuchnikov A. V. *Trudy Vseros. nauch.-tekhn. konf. Nauchnye chteniya po aviatsii, posvyashchyonnye pamyati N. E. Zhukovskogo* [Proceedings of All-Russia. scientific and technical conf. Scientific readings on aviation dedicated to the memory of N. E. Zhukovsky]. Moscow: Izdatel'skiy dom Akademii imeni N. E. Zhukovskogo, 2016, pp. 67–71.
7. Abyshev N. A., Vasiliev M. A., Klyuchnikov A. V., Krikovtsov D. A. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2015, no. 1, pp. 320–321.
8. Vasilyev M. A., Komarov V. I., Konkov M. N., Safronov I. N. Pat. No. 2596032 of the Russian Federation IPC G 01 M 1/10. *Sposob opredeleniya tenzora inercii izdeliya i stend dlya ego realizatsii* [The method for determining the inertia tensor of a product and the stand for its implementation] Appl. 12/05/14; publ. 08.27.16, no. 24.
9. Abyshev N. A., Vasiliev M. A., Klyuchnikov A. V., Krikovtsov D. A., Terekhova S. A., Tsyngueva L. D. *Trudy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Innovacionnyye, informacionnyye i kommunikacionnyye tekhnologii* [Proceedings of the Intern. scientific-practical conf. In-novative, information and communication technologies]. Moscow: Izdatel'skiy dom Akademii imeni N. E. Zhukovskogo, 2016, pp. 265–268.
10. Abyshev N. A., Klyuchnikov A. V., Mikhailov E. F., Chertkov M. S. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2014, no. 2, pp. 234–236.
11. Abyshev N. A., Andreev S. V., Klyuchnikov A. V. *Aviakosmicheskoe priborostroenie* [Aerospace Instrumentation]. 2015, no. 1, pp. 39–45.
12. Glazyrin L. M., Karpovitsky M. S., Klyuchnikov A. V., Malgin A. I., Smirnov G. G., Fomin Yu. P. Pat. №2292533 of the Russian Federation IPC G 01 M 1/02. *Balansirovochnyj stend s vertikal'noj os'yu vrashcheniya* [Balancing stand with a vertical axis of rotation]. Declared. 04/27/2004; publ. 01/27/2007, no. 3.
13. Klyuchnikov A. V. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2012, no. 1, pp. 224–227.
14. Klyuchnikov A. V. *Vestnik SibGAU* [Bulletin of Sib-GAU]. 2015, vol. 16, no. 2, pp. 411–416.

15. Klyuchnikov, A. V. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2010, vol. 2, pp. 12–14.
16. Klyuchnikov A. V., Lysykh A. V., Chertkov M. S. *Vestnik Koncerna PVO «Almaz-Antey»* [Bulletin of the Air Defense Concern Almaz-Antey]. 2015, no. 1, pp. 43–48.
17. Klyuchnikov A. V., Shagimuratov M. D. *Nauchno-tehnicheskij vestnik Povolzh'ya* [Scientific and Technical Bulletin of the Volga region]. 2015, no. 2, pp. 141–143
18. Klyuchnikov A. V. Pat. Of the Russian Federation No. 2499985 of the Russian Federation IPC G 01 M 11/16. *Sposob balansirovki rotora v odnoj ploskosti korrekcii* [The method of balancing the rotor in the same plane of correction]. Declared. 04/11/2012; publ. November 27, 2013, no. 33

Ключников Александр Васильевич

кандидат технических наук, начальник отдела,
Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский научно-исследовательский
институт технической физики имени академика
Е. И. Забабахина
(456770, Россия, г. Снежинск, ул. Васильева, 13)
E-mail: a.klyuchnikov@bk.ru

Васильев Михаил Александрович

заместитель начальника отдела,
Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский научно-исследовательский
институт технической физики имени академика
Е. И. Забабахина
(456770, Россия, г. Снежинск, ул. Васильева, 13)
E-mail: kb2@vniitf.ru

Патокина Надежда Евгеньевна

инженер-конструктор,
Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский научно-исследовательский
институт технической физики имени академика
Е. И. Забабахина
(456770, Россия, г. Снежинск, ул. Васильева, 13)
E-mail: kb2@vniitf.ru

Абышев Николай Александрович

инженер-конструктор,
Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский научно-исследовательский инсти-
тут технической физики имени академика
Е. И. Забабахина
(456770, Россия, г. Снежинск, ул. Васильева, 13)
E-mail: kb2@vniitf.ru

Криковцов Дмитрий Александрович

инженер-конструктор,
Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский научно-исследовательский
институт технической физики имени академика
Е. И. Забабахина
(456770, Россия, г. Снежинск, ул. Васильева, 13)
E-mail: kb2@vniitf.ru

Klyuchnikov Aleksandr Vasilyevich

candidate of technical sciences,
head of department,
Russian Federal Nuclear Centre – All-Russia Research
Institute of Technical Physics named after
academician E. I. Zababakhin
(456770, 13 Vasilyeva street, Snezhinsk, Russia)

Vasilyev Mikhail Aleksandrovich

deputy head of department,
Russian Federal Nuclear Centre – All-Russia Research
Institute of Technical Physics named after
academician E. I. Zababakhin
(456770, 13 Vasilyeva street, Snezhinsk, Russia)

Patokina Nadezhda Evgenyevna

design engineer,
Russian Federal Nuclear Centre – All-Russia Research
Institute of Technical Physics named after
academician E. I. Zababakhin
(456770, 13 Vasilyeva street, Snezhinsk, Russia)

Abyshev Nikolay Aleksandrovich

design engineer,
Russian Federal Nuclear Centre – All-Russia Research
Institute of Technical Physics named after
academician E. I. Zababakhin
(456770, 13 Vasilyeva street, Snezhinsk, Russia)

Krikovtsov Dmitriy Aleksandrovich

design engineer,
Russian Federal Nuclear Centre – All-Russia Research
Institute of Technical Physics named after
academician E. I. Zababakhin
(456770, 13 Vasilyeva street, Snezhinsk, Russia)

УДК 621.828

Конструкции и пути совершенствования систем контроля характеристик геометрии масс летательных аппаратов / А. В. Ключников, М. А. Васильев, Н. Е. Патокина, Н. А. Абышев, Д. А. Криковцов // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 3 (23). – С. 105–114. – DOI 10.21685/2307-4205-2018-3-13.

С. В. Ванцов, А. А. Халявина

**АНАЛИЗ МЕТОДОЛОГИЙ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИРОВАНИЯ
СЛОЖНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ**

S. V. Vantsov, A. A. Khalyavina

**THE ANALYSIS OF METHODOLOGIES FOR MONITORING
AND DIAGNOSING COMPLEX ELECTRONIC DEVICES**

Аннотация. Проведен анализ методологий контроля и диагностирования сложных электронных устройств. Приведены основные критерии эффективности для выбора оптимальной методологии. Проанализированы возможности применения адаптивных реконфигурируемых алгоритмов для современных систем контроля и диагностирования, а также их основные достоинства и недостатки. Проведенный анализ показал, что наиболее перспективным направлением в усовершенствовании систем контроля и диагностирования является использование адаптивных реконфигурируемых алгоритмов совместно с открытыми полными библиотеками.

Ключевые слова: отказы, алгоритм, модульная архитектура, реконфигурируемая структура, адаптивность.

Abstract. This article analyzes the methodologies for monitoring and diagnosing complex electronic devices. The main performance criteria for choosing the optimal methodology are presented. Possibilities of application of adaptive reconfigurable algorithms for modern systems of control and diagnostics, as well as their main advantages and disadvantages are analyzed. The analysis showed that the most promising direction in the improvement of control and diagnosis systems is the use of adaptive reconfigurable algorithms together with an open replenished base of the causes of failures.

Key words: failures, algorithm, modular architecture, reconfigurable structure, adaptability.

Введение

Сложно представить разработку или производство на заводах современных сложных электронных устройств без использования автоматизированных систем контроля и диагностирования. Последние существенно увеличивают эффективность настройки и отладки, как первых образцов, так и на этапе производства.

Однако каждая модернизация устройств влечет за собой необходимость доработки, а в некоторых случаях и существенного изменения структуры систем контроля и диагностирования. При этом лимит средств и времени часто ограничен.

Основное назначение систем контроля и диагностирования – оперативное обнаружение отказов и предупреждение возможных последствий (принятие мер по предотвращению последствий аварийной ситуации).

Важными характеристиками современных систем контроля является высокая степень унификации как программной, так и аппаратной составляющей.

Одно из главных требований к таким системам – высокий уровень безотказности на протяжении всего жизненного цикла. Другими словами, должно выполняться условие

$$p(t) \rightarrow 1, \text{ при } t \leq t_{\phi}, \quad (1)$$

где $p(t)$ – вероятность безотказной работы ($p(t) > 0,9$); t – текущий момент времени функционирования; t_{ϕ} – время функционирования устройства (5 лет и более).

Все вышесказанное определяет большую номенклатуру решений, позволяющих обеспечить высокий уровень надежности как самих электронных устройств, так и систем контроля и диагностирования.

Одновременно при проектировании и разработке систем контроля и диагностирования становятся важными такие характеристики, как:

- возможность изменения аппаратных и программных средств без привлечения разработчиков и профессиональных программистов;
- простота перестройки алгоритмов управления и контроля;
- время и точность локализации неисправностей;
- прогнозирование и предотвращение отказов;
- снижение избыточности представляемой оператору информации;
- снижение требований к квалификации оператора;
- повышение безопасности эксплуатации и др. [1, 2].

Наличие качественных программ и надежных аппаратных средств в настоящее время является лишь необходимым, но не достаточным условием. На современном этапе развития сложных электронных устройств для обеспечения высокой отказоустойчивости объекта необходимо совершенствование методик построения алгоритмов контроля.

Методики повышения надежности

Основой разработки высоконадежных устройств и систем для их контроля становится выбор того или иного комплекса мер, которые позволят обеспечить:

- оперативную локализацию и предотвращение последствий ошибки (методики позволяющие предотвратить возникновение или введение ошибок);
- высокий уровень отказоустойчивости (обеспечение корректной работы при наличии ошибок);
- своевременное исправление ошибки (сокращение количества ошибок или степени их опасности);
- прогнозирование ошибки (оценка состояния блоков и фиксация возникающих отклонений, которые могут привести к отказу).

Выпуск электронных устройств в ряде случаев не является серийным и обладает уникальным набором параметров, обусловленных его назначением, для контроля которых требуется разработка специализированной аппаратуры контроля и диагностирования, производство которой и вовсе единично.

Последнее обстоятельство определяет нецелесообразность использования статистических подходов к решению задач повышения достоверности контрольно-диагностических задач. Так как при производстве и эксплуатации высоконадежных электронных устройств основной целью является не определение процента годных, а исправность конкретного образца по всем параметрам.

Альтернативой статистических способов является причинно-следственный подход, в основе которого анализ возможных причин и механизмов отказов. К достоинствам такого подхода можно отнести:

- обеспечение высокой достоверности прогнозирования вероятности безотказной работы на протяжении заданного времени;
- снижение вероятности возникновения ранних отказов.

Однако причинно-следственный подход не полностью исключает случайные, скрытые и перемежающиеся отказы.

Несмотря на значительные достижения в области контроля и диагностирования [3 – 5], вопросы локализации и определения причин отказа до сих пор остаются одними из трудоемких и длительных по времени, а в некоторых случаях и не решаемых, без привлечения разработчиков, задач. Как следствие, разработчики систем контроля непрерывно занимаются поиском методов, которые обеспечат снижение времени и трудоемкости разработки одновременно с высокой степенью достоверности контроля и глубины диагностирования.

На практике процесс контроля является итерационным. Все блоки и приборы, начиная с этапа создания самих систем контроля, проходят экспериментальную отработку с использованием специальных имитаторов и устройств контроля в объеме, позволяющих распознать, локализовать и устранить большую часть причин отказов. Отдельно проверенные приборы и блоки устанавливаются в устройство более высокого уровня и снова проходят проверку. При этом основными этапами поиска возможных причин неисправностей являются:

- входной контроль с определением соответствия основных характеристик установочным допускам;
 - проведение тестов при длительной работе (8 ч и более) и воздействии внешних факторов (температура, вибрация и т.д.), которые позволяют выявить нестабильность характеристик и снизить возможность случайных отказов;
 - проведение многократных, непрерывных тестов после длительного функционирования (электро-термотренировка и т.д.), позволяющих частично отсеять приборы со скрытыми дефектами.
- Такой подход позволяет в большинстве случаев на этапе отладки отфильтровать приборы и блоки, содержащие скрытую неисправность.
- Однако, несмотря на ряд мер по повышению достоверности и безотказности, на протяжении всего жизненного цикла возникают отказы, причинами которых являются неидеальность объектов контроля, ошибки разной природы (табл. 1), дефекты комплектующих и т.д.

Таблица 1

Факторы снижения надежности

Вид факторов	Способы снижения влияния факторов
Отказы аппаратуры	– резервирование цепей – применение высоконадежных компонентов
Ошибки программного обеспечения	– применение неоднократно проверенных и хорошо протестированных программ. – повышение качества ПО
Ошибки специалистов	– повышение уровня автоматизации процессов – высококвалифицированные работники

При этом если первые две причины отказов устранимы посредством выбора комплектующих и совершенствования технологических процессов, то последние часто плохо предсказуемы, а в некоторых случаях и не устранимы.

Снизить влияние различных факторов возможно за счет рационального выбора методов и использования усовершенствованных методологий контроля и диагностирования.

Особенности выбора методов контроля и диагностирования

Для обеспечения заданного уровня достоверности определения отказов используют функциональное диагностирование в процессе всего периода эксплуатации [6, 7]. При этом часто используется комплексный подход, при котором разрабатываются методики, различным образом сочетающие в себе достоинства основных методов функционального диагностирования (рис. 1).



Рис. 1. Методы функционального диагностирования

Основными аргументами при выборе методов являются: объект элементарной проверки, способ подачи воздействия и снятия ответов, а также критерии оценки полученных результатов.

При реальном контроле устройств заключение об их состоянии делается на основании оценки ряда параметров. Критерием неисправности является выход параметров за определенные, четко очерченные границы, которые определяются условиями возникновения неисправностей.

На практике встречаются такие ситуации, когда процесс контроля заканчивается недостоверным результатом, если в системе контроля или электронном устройстве на момент окончания проверки есть обнаруженная ошибка. Такая ошибка может иметь два последствия:

- выдача некорректного результата до обнаружения отказа;
- длительный и сложный поиск причин некорректного результата.

В случае, если неисправность обнаружена, но не локализована, требуются дополнительные меры по ее локализации, которые могут быть весьма трудоемки. В такой ситуации актуальной становится задача выбора методов для проведения дополнительной проверки и оптимального количества средств контроля, различных уровней, без использования дополнительной аппаратуры. Поиск решений этой задачи является основой для выбора методологии при проектировании контрольно-диагностической аппаратуры.

Основными принципами для выбора методологий при создании высокоэффективных систем контроля являются:

- обеспечение заданной полноты и глубины контроля;
- выбор структуры, обеспечивающей простоту модернизации;
- рациональное разбиение аппаратуры на блоки (составные части), облегчающие тестирование и локализацию отказа;
- выбор интерфейсов обмена информацией между блоками, обеспечивающих отдельное диагностирование;
- создание диагностических баз, на основе которых принимается решение о неисправности;
- создание структуры диагностического алгоритма, обеспечивающего возможность иерархического диагностирования.

Кроме того, большое внимание должно уделяться проблеме адаптации структуры не только аппаратно-программной, но и алгоритмической составляющих контрольно-диагностической аппаратуры в условиях изменения или корректировки задач, критериев или ограничений для конкретного устройства.

На текущий момент повышение эффективности существующих систем контроля и диагностирования достигается за счет использования разработчиками таких решений, как:

- построение аппаратуры и программного обеспечения на основе независимой блочно-модульной структуры (позволяет снизить трудоемкость разработки и повысить достоверность за счет создания структуры из базового набора типовых модулей, с учетом специфики объекта);
- разработка и введение в состав аппаратуры экспертных систем и элементов искусственного интеллекта;
- разработка и исследование интеллектуальных алгоритмов контроля и диагностирования состояния на основе нейронных сетей и алгоритмов нечеткой логики;
- введение в конструкцию элементов, обеспечивающих возможность оперативной реакции при возникновении заранее предвиденных опасных отказов;
- построение автоматических систем идентификации на основе следящих моделей (без отключения объектов и подключения дополнительных средств измерения).

Однако, несмотря на достоинства, ряд решений оказываются несравнимо дороже самих устройств.

А учитывая требования к массо-габаритным характеристикам, возможности использования методов резервирования значительно ограничены [8]. Подобные ограничения обуславливают необходимость использования высоконадежных комплектующих с большим ресурсом.

Экспертные системы позволяют частично решить проблему определения причины и места отказа без привлечения разработчиков. Однако в ряде случаев этот процесс оказывается длительным по времени и не всегда дает однозначный ответ.

Методика разработки объектных программно-аппаратных блоков позволяет использовать различные тесты, написанные на стандартном языке программирования. Наличие таких функций, как возможность загрузки различных проектов, обеспечивает расширение номенклатуры контролируемых изделий, а также позволяет снизить трудоемкость контроля и диагностирования новых модификаций. Используемые программные модули позволяют конфигурировать аппаратуру во время работы [9]. Однако решения на основе независимых программно-аппаратных модулей и самообучающихся нейронных сетей часто существенно увеличивают стоимость разработки, а в некоторых случаях и значительно ухудшают массо-габаритные характеристики сложных устройств при их единичном и мелкосерийном производстве.

Особенности построения алгоритмов контрольно-диагностических тестов

Использование в последние десятилетия структуры на основе программно-аппаратных модулей существенно повысило возможности модернизации и позволяет проектировщикам создавать системы контроля с высоким уровнем унификации.

Основным направлением развития контрольно-диагностической аппаратуры становится поиск решений, которые обеспечат высокую точность и скорость локализации отказов. Одно из решений – разработка адаптивных реконфигурируемых систем, в основе которых – модульная структура и использование параллелизма (распределенная обработка информации) при разработке всех составляющих (аппаратной, программной и алгоритмической) [10 – 12].

При этом если достижения в области разработки распределенной модульной структуры программно-аппаратной составляющей весьма значительны, то алгоритмической составляющей уделено меньше внимания. Поэтому тенденция создания алгоритмов, не привязанных к конкретному типу устройств, с возможностью реконфигурируемости и легкой адаптации к модификациям становится все более актуальной. К основным достоинствам реконфигурируемых алгоритмов стоит отнести:

- универсальность, т.е. возможность контроля и диагностирования практически любой модификации устройства;
- возможность модификации на любых стадиях разработки и в процессе эксплуатации;
- высокое быстродействие и надежность;
- совместимость с большим количеством устройств за счет возможности выбора уровней и параметров сигналов;
- низкую по сравнению с заказными и полузаказными стоимость реализации и небольшого времени, затрачиваемого на модернизацию.

При этом важным качеством алгоритма, определяющим диапазон решений и свойств, становится степень гибкости. В частном случае уровень гибкости может опуститься до перестройки элементарных проверок, входящих в состав модульного алгоритма [13].

Реконфигурация достигается путем разбиения алгоритма на фрагменты, выполняемые последовательно или параллельно. Последний вариант приводит к существенному уменьшению времени контроля и диагностирования. Однако в силу особенностей ряда устройств на практике чаще встречаются последовательно-параллельные алгоритмы.

Сложность проверок при этом определяется логической структурой и степенью реконфигурации.

Процесс изменения конфигурации может быть реализован при наличии соответствующих библиотек, полученных в процессе создания проекта.

Типовая структура реконфигурированного алгоритма (рис. 2) состоит из двух частей:

- постоянной (центральный блок);
- «реконфигурируемые» проверки, которые можно объединять различным образом.



Рис. 2. Структура реконфигурируемого алгоритма:
 $\Pi_1 \dots \Pi_n$ – независимые проверки ($n = 1, 2, \dots$);
 $t_1 \dots t_n$ – продолжительность каждой проверки по времени, с

В большинстве случаев конфигурирование должно выполняться таким образом, чтобы основные тесты были реализованы на основании специализированных проверок.

Для строгой формализации процесса организуется общая структура и распределяют вычисления таким образом, чтобы минимизировать целевую функцию.

Критериями эффективности разработанной методологии контроля являются такие характеристики, как:

- производительность;
- аппаратная и программная избыточность;
- сложность алгоритма;
- надежность системы;
- возможность реконфигурации в реальном времени;
- трудоемкость модернизации и др.

Для сложного электронного устройства необходимо создание структуры диагностирования (рис. 3), которая разрабатывается с учетом диагностических задач (по количеству выявленных и возможных отказов) подобных параллельных цепочек.



Рис. 3. Структура алгоритма автоматизации процесса диагностирования

При создании подобной структуры важными становятся такие задачи, как:

- разработка основы построения реконфигурируемых структур на базе модулей;
- разработка специализированных библиотек с учетом особенностей конструктивно-технологической базы;
- разработка непосредственной структурной реализации алгоритмов обработки.

При этом в основу такой структуры должны быть положены требования реконфигурируемости, многоуровневости и параллельности обработки данных.

Входящие в состав программной составляющей специальные библиотеки, от структурированности и полноты которых зависит не только эффективность работы, но и возможность выбора оптимальной пары (метод-архитектура), позволяют существенно упростить процесс модернизации.

Критерии выбора конфигурации алгоритма

В общем случае задача выбора сводится к задаче определения оптимального из предварительно сформированного и расширяемого множества решений.

В случае выбора оптимального варианта конфигурации алгоритма задача сводится к минимизации функционала L (2) при заданном ограничении (3):

$$L = aT_d + bQ_d \rightarrow \min, \quad (2)$$

$$T_d < T_0 \text{ и } Q_d < Q_0, \quad (3)$$

где a и b – весовые коэффициенты; T_d – время выполнения алгоритма; Q_d – стоимость реконфигурации алгоритма; Q_0, T_0 – заданные предельные значения параметров.

Основными критериями оценки реконфигурируемого алгоритма являются:

– эффективность по временным характеристикам:

$$F_t(n) = \frac{T_1(n)}{T_p(n)}, \quad (4)$$

где $F_t(n)$ – эффективность по времени; $T_1(n)$ – время стандартного алгоритма; $T_p(n)$ – время оптимизированного алгоритма; n – количество входных параметров;

– эффективность использования алгоритма в целом:

$$E_p(n) = \frac{F_t(n)}{p}, \quad (5)$$

где $E_p(n)$ – эффективности использования алгоритма; $F_t(n)$ – эффективность по времени; p – количество проверок.

Таким образом, задача создания системы с реконфигурируемым алгоритмом, которая представляет собой проблемно-ориентированные конфигурации применительно к каждому конкретному электронному устройству является наиболее актуальной в настоящее время.

Использование комплексного подхода при разработке систем контроля позволит не только обеспечить высокий качественный уровень устройств для различного назначения и снизить трудоемкость разработки самих систем, но и обеспечить возможность использовать системы контроля и диагностирования для прогнозирования состояния на протяжении всего жизненного цикла.

К тому же одной из особенностей систем контроля с использованием реконфигурируемых алгоритмов является возможность наращивания функциональных ресурсов посредством дополнения открытых библиотек. Наличие открытых библиотек позволяет создавать новые структуры, а также совершенствовать имеющиеся, что нередко требуется при изменении параметров контролируемых устройств или при коррекции контрольно-диагностических алгоритмов.

Заключение

Учитывая высокую степень унификации программно-аппаратных составляющих сложных электронных устройств, использование реконфигурируемых алгоритмов позволит повысить такие характеристики, как гибкость и обеспечить высокий уровень надежности и модифицируемости при решении задач анализа и идентификации технического состояния сложных электронных устройств различного применения. Наличие открытых библиотек конфигурации позволит за короткий срок реализовать алгоритм для новых или модернизированных устройств.

Библиографический список

1. *Дорохов, А. Н.* Обеспечение надежности сложных технических систем / А. Н. Дорохов, В. А. Керножицкий, А. Н. Миронов, О. А. Шестопалова. – 2-е изд. – М.: Лань, 2011. – 352 с.
2. *Зорина, Т. Ю.* Риски ИТ проектов и методы их оценки / Т. Ю. Зорина, Т. Ю. Чернышева // Труды Северо-Кавказского филиала Московского технического университета связи и информатики. – 2013. – № 1. – С. 115–118.
3. *Яматов, А. Р.* Методика синтеза структурной схемы надежности системы с применением модифицированного градиента в процедуре наискорейшего спуска / А. Р. Яматов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. – 2013. – № 7. – С. 63–73.
4. *Тюрин, С. Ф.* Анализ методов обеспечения пассивной отказоустойчивости цифровых устройств и систем / С. Ф. Тюрин, О. А. Громов, А. А. Сулейманов, А. В. Греков // Вестник Поволжского государственного технологического университета. – 2011. – № 5. – С. 144 – 153.
5. *Заведеев, А. И.* Диагностика состояния и принципы повышения отказоустойчивости бортовой системы управления космического аппарата / А. И. Заведеев, А. Ю. Ковалев // Труды МАИ. – 2015. – № 54. – С. 1–9.

6. МЭК 61508_5 (1998). Функциональная безопасность электрических/электронных/ программируемых электронных систем, связанных с безопасностью. Часть 5. Примеры методов для определения уровней целостности защиты.
7. Савкин, Л. В. Построение реконфигурируемой системы функционального контроля и диагностики бортового комплекса управления космического аппарата / Л. В. Савкин, А. Е. Ширшаков, В. М. Новичков // *Авиакосмическое приборостроение*. – 2015. – № 6. – С. 8–13.
8. Денисенко, В. В. Аппаратное резервирование в промышленной автоматизации / В. В. Денисенко // *Современные технологии автоматизации*. – 2008. – № 2. – С. 90–99.
9. Коваленко, В. Б. Организация многоуровневого программирования реконфигурируемых вычислительных систем / В. Б. Коваленко, Е. А. Семерников // *Вестник компьютерных и информационных технологий*. – 2011. – № 9. – С. 3–10.
10. Шидловский, С. В. Синтез реконфигурируемых систем / С. В. Шидловский, В. И. Сырякин, В. С. Шидловский // *Доклады ТУСУРа*. – 2010. – № 1 (21), ч. 2. – С. 131–136.
11. Шидловский, С. В. Логическое управление в автоматических системах с перестраиваемой структурой / С. В. Шидловский // *Известия РАН. Теория и системы управления*. – 2006. – № 2. – С. 123–127.
12. Таненбаум, Э. Распределенные системы. Принципы и парадигмы / Э. Таненбаум, М. Ван Стеен. – СПб. : Питер, 2003. – 877 с
13. Каляев, И. А. Реконфигурируемые мультиконвейерные вычислительные структуры / И. А. Каляев, И. И. Левин, Е. А. Семерников, В. И. Шмойлов. – 2-е изд. – Ростов-н/Д : Изд-во ЮНЦ РАН, 2009. – 344 с.

References

1. Dorokhov A. N., Kernozhytsky V. A., Mironov A. N., Shestopalova O. A. *Obespechenie nadezhnosti slozhnykh tekhnicheskikh sistem* [Ensuring the reliability of complex technical systems]. 2nd ed. Moscow: Lan', 2011, p. 352.
2. Zorina T. Yu., Chernysheva T. Yu. *Trudy Severo-Kavkazskogo filiala Moskovskogo tekhnicheskogo universiteta svyazi i informatiki* [Proceedings of the North Caucasus branch of the Moscow Technical University of Communications and Informatics]. 2013, no. 1, pp. 115–118.
3. Yamatov A. R. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Perm national research Polytechnic University]. 2013, no 7, pp. 63–73.
4. Tyurin S. F., Gromov O. A., Suleimanov A. A., Grekov A. V. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Volga state technological University]. 2011, no. 5, pp. 144–153.
5. Zavedeev A. I., Kovalev A. Yu. *Trudy MAI* [Trudy MAI]. 2015, no. 54, pp. 1–9.
6. МЭК 61508_5 (1998). *Funkcional'naya bezopasnost' ehlektricheskikh/ehlektronnykh/ programmiruemykh ehlektronnykh sistem, svyazannykh s bezopasnost'yu. CHast' 5. Primery metodov dlya opredeleniya urovnej celostnosti zashchity* [Functional safety of electrical / electronic / programmable electronic safety-related systems. Part 5. Examples of methods for determining the integrity levels of protection].
7. Savkin L. V., Shirshakov A. E., Novichkov V. M. *Aviakosmicheskoe priborostroenie* [Aerospace instrumentation]. 2015, no. 6, pp. 8–13.
8. Denisenko V. V. *Covremennye tekhnologii avtomatizatsii* [Modern automation technologies]. 2008, no. 2, pp. 90–99.
9. Kovalenko V. B., Semernikov E. A. *Vestnik komp'yuternykh i informacionnykh tekhnologij* [Bulletin of Computer and Information Technologies]. 2011, no. 9, pp. 3–10.
10. Shidlovsky S. V., Syryamkin V. I., Shidlovsky V. S. *Doklady TUSURa* [Reports of TUSUR]. 2010, no. 1 (21), part 2, pp. 131–136.
11. Shidlovsky S. V. *Izv. RAN. Teoriya i sistemy upravleniya* [Izv. RAS. Theory and control systems]. 2006, no. 2, pp. 123–127.
12. Tanenbaum E., Van Steen M. *Raspredelennye sistemy. Principy i paradigmy* [Distributed systems. Principles and paradigms]. Saint-Petersburg: Peter, 2003, 877 p.
13. Kalyaev I. A., Levin I. I., Semernikov E. A., Shmoylov V. I. *Rekonfiguriruemye mul'tikonvejernye vychislitel'nye struktury* [Reconfigurable multi-pipeline computing structures]. 2nd ed. Rostov-on-Don: Publishing house of the SSC, 2009, 344 p.

Ванцов Сергей Васильевич

кандидат технических наук, доцент,
кафедра технологии приборостроения,
Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)
(125993, Россия, г. Москва,
Волоколамское шоссе, д. 4)
E-mail: vancov@medpraktika.ru

Vantsov Sergey Vasil'evich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of instrumentation technology,
Moscow Aviation Institute
(National Research University),
(125993, 4 Volokolamskoe highway, Moscow, Russia)

Халявина Анна Александровна

аспирант,
Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)
(125993, Россия, г. Москва,
Волоколамское шоссе, д. 4)
E-mail: anumasar@yandex.ru

Khalyavina Anna Aleksandrovna

postgraduate student,
Moscow Aviation Institute
(National Research University),
(125993, 4 Volokolamskoe highway, Moscow, Russia)

УДК 481.2: 629.76

Ванцов, С. В.

Анализ методологий контроля и диагностирования сложных электронных устройств /
С. В. Ванцов, А.А. Халявина // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 3 (23). – С. 115–123. –
DOI 10.21685/2307-4205-2018-3-14.

А. П. Адамов, А. А. Адамова, С. Г. Семенцов, А. Т. Темиров

ПРОТОКОЛЫ ОБМЕНА В БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЯХ РЕГИСТРАЦИИ СОБЫТИЙ¹

A. P. Adamov, A. A. Adamova, S. G. Sementsov, A. T. Temirov

COMMUNICATION PROTOCOLS IN WIRELESS SENSOR NETWORKS OF EVENT REGISTRATION

Аннотация. Актуальность работы обусловлена появлением большого числа новых специализированных протоколов обмена для беспроводных сенсорных сетей, ориентированных на регистрацию события. В отечественной литературе практически не рассматривается именно этот класс беспроводных сетей. Целью работы является проведение расширенного анализа протоколов для беспроводных сенсорных сетей, ориентированных на регистрацию события. Рассматривается базовый протокол передачи данных для такого класса сетей – Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy Protocol. Демонстрируются его преимущества и недостатки с точки зрения энергопотребления и достоверности принимаемых данных. Показано, что протокол не всегда обеспечивает выбор в качестве вершины кластера узла, имеющего достаточный для передачи данных запас энергии источника питания. Кратко анализируются функциональные возможности каждого протокола, особо выделяются возможности регистрации места возникновения события, регистрации нескольких событий, происходящих одновременно и т.д. Рассматриваются базовые принципы организации каждого протокола. Особое внимание уделяется энергопотреблению сети при использовании того или иного протокола и методам обеспечения достоверности данных, принимаемых блоком управления. Рассмотрены механизмы явного и неявного подтверждения приема данных блоком управления и соседними узлами сети. Для протоколов реального времени проведена оценка вносимой задержки между регистрацией события сенсором и приемом информации о нем блоком управления. Проанализированы методы предотвращения перегрузки в сети при наличии большого числа активных сенсоров. По результатам проведенного сравнительного анализа создана сводная таблица, демонстрирующая особенности каждого протокола и его функциональные возможности.

Ключевые слова: беспроводные сенсорные сети, протоколы обмена, регистрация событий, динамическая кластеризация, энергопотребление, достоверность передаваемых данных, вершина кластера, сенсорный узел.

Abstract. The relevance of the work is due to the emergence of a large number of new specialized exchange protocols for wireless sensor networks focused on event registration. In the domestic literature, this class of wireless networks is practically not considered. The goal of the work is to conduct an extended protocol analysis for wireless sensor networks oriented to event registration. We consider the basic data transfer protocol for this class of networks – Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy Protocol. Its advantages and disadvantages in terms of power consumption and reliability of received data are demonstrated. It is shown that the protocol does not always provide the choice of a node as the top of a cluster, which has an energy supply source sufficient for data transmission. The functional capabilities of each protocol are briefly analyzed, the possibilities of registering the place of occurrence of an event, recording several events occurring simultaneously, etc. are highlighted. The basic principles of the organization of each protocol are considered. Particular attention is paid to the power consumption of the network when using a particular protocol and methods to ensure the reliability of data received by the control unit. The mechanisms of explicit and implicit acknowledgment of data reception by the control unit and neighboring network nodes are considered. For real-time protocols, the estimated delay between the registration of an event by the sensor and the receipt of information about it by the control unit was evaluated. Analyzed methods of preventing overload in the network in the presence of a large number of active sensors. According to the results of the comparative analysis, a summary table was created, demonstrating the features of each protocol and its functionality.

Key words: wireless sensor networks, communication protocols, event registration, dynamic clustering, power consumption, data reliability, cluster head, sensor node.

¹ Работа выполнена при частичной финансовой поддержке по Гранту РФФИ №17-07-00689.

Введение

Беспроводные сенсорные сети (БСС) все шире проникают во все области науки и техники. Они используются для решения широкого круга задач, позволяя автоматизировать процесс сбора и первичной обработки различной информации и регистрации событий. Сенсорные сети в общем случае включают в себя набор чувствительных элементов (сенсоров) со встроенным радиомодулем, а также блок управления, осуществляющий сбор информации. Сенсоры могут передавать информацию как друг другу, так и непосредственно блоку управления в зависимости от используемого протокола обмена данными. Оптимизация информационного обмена между сенсорами и блоком управления может происходить исходя из одного или нескольких критериев, таких как максимальная надежность регистрируемых данных, минимальное энергопотребление, минимальные задержки в сети и т.д. Различные стратегии оптимизации подразумевают как различную архитектуру сети, так и различные методы маршрутизации данных. В данной статье мы ограничимся рассмотрением методов маршрутизации и протоколов обмена для БСС, ориентированных на регистрацию некоего события.

Долгое время базовым протоколом для беспроводных сенсорных сетей, ориентированных на регистрацию события, являлся протокол *Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy Protocol*. Он обеспечивал динамическую генерацию сенсорного кластера, обеспечивающего сбор и передачу данных блоку управления с наименьшими затратами энергии. Синтезировалось динамически изменяющееся дерево транзакций между сенсором источником и блоком управления.

В то же время данный протокол имел ряд существенных недостатков, например, все узлы имели одинаковую вероятность стать вершиной кластера без учета их запаса энергии, что могло привести к потерям данных. В настоящее время разработан целый ряд более современных протоколов, обеспечивающих либо большую функциональность (определение места возникновения события, регистрация множества событий, происходящих одновременно), либо снижение энергопотребления при заданном уровне достоверности принимаемых данных.

Такой подход позволяет выбрать тот или иной протокол исходя из решаемой сенсорной сетью задачи и оптимизировать ряд наиболее важных в данном конкретном случае параметров сети.

Анализ функционирования распределенных сенсорных сетей

Сенсорные сети, ориентированные на регистрацию события, большую часть времени находятся в состоянии ожидания, в котором их энергопотребление минимально. В состоянии ожидания сенсоры не принимают и не передают данные. В активный режим сенсоры переходят только после регистрации события, когда воздействие на чувствительный элемент превышает некоторое пороговое значение [1, 2].

Поскольку запас энергии каждого сенсора ограничен, то важнейшей задачей при реализации таких БСС является минимизация энергии, затрачиваемой на сбор и передачу информации блоку управления. Одним из путей снижения энергопотребления является использование различных протоколов динамической кластеризации после регистрации события [3]. Динамическая кластеризация позволяет не только снизить энергопотребление за счет построения оптимального дерева транзакций для каждого источника данных, но и адаптивно подстраивать достоверность передаваемых данных с помощью служебных сигналов обратной связи [4].

Формирование кластера активизируется неким событием и кластеры создаются в режиме реального времени для правильной реакции на событие. Каждый кластер включает в себя только те сенсоры, которые в данный момент времени передают данные конкретному блоку управления. В результате формируется архитектура, показанная на рис. 1.

С точки зрения энергоэффективности в БСС наибольший практический интерес представляют модификации базового протокола передачи данных – *Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy* (LEACH), который представляет собой TDMA-протокол с динамической кластеризацией [5–8]. Задача протокола – минимизация энергии, необходимой для создания и обслуживания кластеров сенсоров. LEACH является иерархическим протоколом, в котором сенсоры передают данные вершине кластера, где происходит накопление и компрессия данных и далее их передача блоку управления. LEACH-протокол предполагает, что каждый сенсор имеет запас энергии достаточный для передачи данных непосредственно блоку управления или ближайшей вершине кластера.

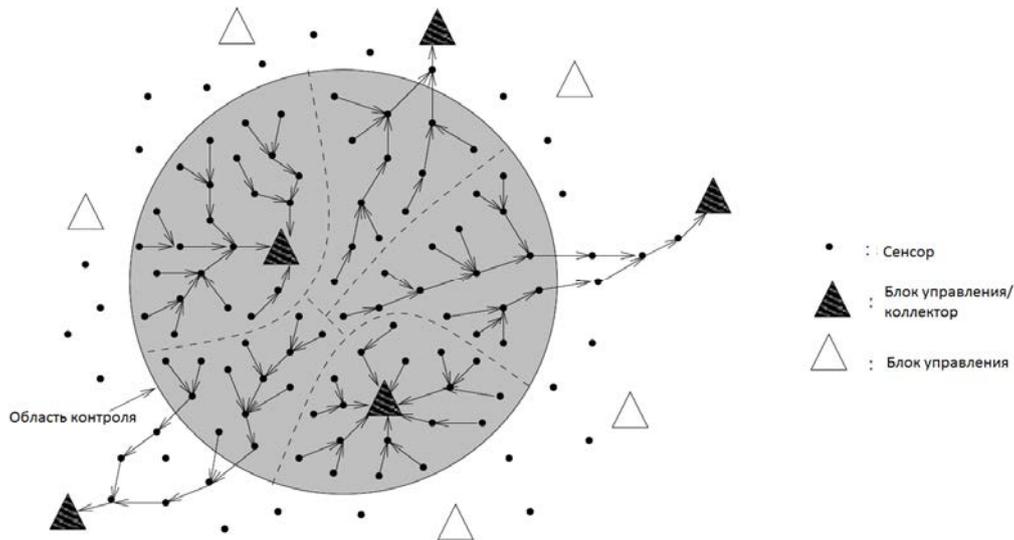


Рис. 1. Процесс кластеризации при наличии нескольких блоков управления

Поскольку алгоритм LEACH не оперирует информацией о текущем энергетическом состоянии сенсорного узла, то он не дает гарантий по выбору «хорошего» сенсорного узла в качестве головного узла кластера, и в этом качестве может быть выбран давно не избираемый член кластера с неудовлетворительными энергетическими характеристиками.

Анализ протоколов обмена в беспроводных сенсорных сетях регистрации событий

Рассмотрим более современные протоколы, созданные на основе LEACH.

Event-to-Sink Reliable Transport (ESRT) Protocol – решение о наличии события принимается на основании информации о количестве сенсоров, находящихся в зоне события, а не информации от одного сенсора [9, 10]. Достоверность обнаружения события подстраивается за счет изменения частоты передачи пакетов. Если достоверность снижается ниже требуемой, протокол повышает частоту отчетов, если достоверность выше, чем требуется, протокол снижает частоту отчетов. К преимуществам протокола можно отнести то, что приемник данных собирает информацию только о числе узлов в области события и обеспечивает различный уровень достоверности обнаружения исходя из информации о состоянии сети. Основной недостаток – метод централизованного управления не является энергоэффективным. В случае если в зоне действия датчика происходит несколько событий одновременно, то настройка частоты пакетов для всех узлов датчика, не приведет к повышению производительности, поскольку события могут быть независимы друг от друга.

Loss Tolerant Reliable Event Sensing (LTRES) Protocol – контроль за перегрузкой выполняется на основе механизма адаптации скорости передачи данных конечного узла [11]. Блок управления вычисляет уровень достоверности обнаружения события и передает это значение передающим узлам. Основываясь на этой информации, передающие узлы обновляют скорость передачи данных, таким образом контролируя перегрузку. Преимущества протокола – управление сетевым трафиком, быстрое и надежное распознавание событий. Основной недостаток – снижение энергоэффективности из-за использования механизма адаптации скорости передачи данных в источнике.

Reliable Robust and Real-Time (RRRT) Protocol – в протоколе используются две концепции: привязка к задержке «событие-действие», определяемой приложением, и комбинированный механизм управления перегрузкой, позволяющий достичь требуемой достоверности обнаружения и снизить расход энергии [12, 13]. Преимущества протокола – надежное обнаружение событий, энергоэффективность. Основной недостаток – использование механизмов обнаружения и контроля перегрузки приводит к дополнительным расходам энергии.

Simultaneous Multiple Event-to-Sink Reliable Transport (SMESRT) Protocol – протокол предназначен для получения достоверной информации об одновременном обнаружении нескольких событий [14]. Он позволяет управлять сетевой нагрузкой с целью уменьшения трафика в приемнике и экономии энергии. Сенсорные узлы, которые обнаружили событие, образуют кластер и генериру-

ют идентификатор события. Идентификатор события распространяется с использованием внутрисетевого протокола передачи данных либо на основе метода идентификации события на основе кластера. Для балансировки энергии сенсоров вершина кластера перемещается между всеми узлами кластера. Узлы, обнаружив событие, отправляют пакеты с информацией о событии в вершину кластера на заданной частоте для определенного периода или длительности. Затем вершина кластера информирует блок управления о состоянии сети. Преимущества протокола – управление нагрузкой на вершины кластера, обеспечивающее меньший трафик, протокол может назначать различную частоту передачи для разных событий. Недостаток – назначение различных частот передачи приводит к дополнительным потерям энергии.

Congestion and Delay Aware Routing (CODAR) Protocol – протокол делит сенсорные узлы на две категории: критические и обычные [15]. Критические узлы – это узлы ближайшие к месту возникновения события. Если же вблизи узла ничего не происходит, критические узлы становятся обычными. Основная задача протокола заключается в повышении достоверности и своевременности передачи данных критическими узлами и предотвращении переполнения. Протокол использует два механизма: предотвращение переполнения и управление задержкой доставки от источника к приемнику.

Преимущества протокола – обеспечивает доставку критически важных данных с заданными задержками, имеет механизм снижения перегрузки за счет обхода перегруженных узлов во время выбора маршрута. Основные недостатки – не эффективен при большом количестве критических узлов, низкая энергоэффективность.

Delay Sensitive Transport (DST) Protocol – основная задача протокола – своевременно и надежно передавать информацию о событии в приемник данных с минимальными потерями энергии и без перегрузок [16]. Протокол использует два основных механизма: обнаружения перегрузки и транспортировки событий. Механизм обнаружения перегрузки для протокола реализуется следующим образом. Любой узел датчика, буфер которого переполняется из-за перегрузки, информирует приемник о состоянии перегрузки с помощью бита уведомления о переполнении в заголовке пакета с информацией о событии. Механизм транспортировки событий в реальном времени выполняет детектирование событий в реальном времени с привязкой к задержке между событием и его обнаружением. Основной компонент задержки между событием и его обнаружением – задержка при передаче и обработке события.

Преимущества – обнаружение и контроль перегрузок. Недостаток – механизм корректировки частоты передачи данных требует дополнительного расхода энергии.

Optimized Energy-Delay Sub-Network Routing (OEDSR) Protocol – протокол предполагает, что узлы находятся либо в режиме ожидания, либо в состоянии сна, но как только происходит событие узлы, которые находятся рядом с областью возникновения события, становятся активными и формируют подсеть [16]. Эта подсеть внутри неактивной сети экономит энергию, поскольку только некоторые узлы в сети активны в ответ на событие. Активные узлы образуют кластер и выбирают вершину. Преимущества протокола – формирование кластеров приводит к снижению потерь энергии, формирование подсети экономит энергию, так как активна только часть сети. Недостатком является то, что большое число пакетов, передаваемых между сенсорными узлами и блоком управления может привести к появлению задержек.

Real-Time and Reliable Transport (RT) 2 Protocol – основная задача протокола – обеспечить достоверную передачу параметров события от датчика в приемник данных или базовую станцию с минимальными потерями энергии и получить своевременную реакцию на информацию от сенсора [16]. Протокол одновременно обеспечивает обмен в режиме реального времени и выполнение требований, предъявляемых к достоверности данных. В этом протоколе используются два вида узлов: сенсорные узлы (sensor nodes) и активные узлы (actor nodes). Сенсорные узлы обнаруживают событие и передают полученную информацию в активные узлы. Активные узлы взаимодействуют друг с другом, чтобы принять решение, а затем отправляют пакет с информацией о событии в блок управления через другие активные узлы.

Преимущества – адаптация к динамической структуре сети. Основной недостаток – настройка конфигурации приводит к появлению дополнительных задержек.

Event Reliability Protocol (ERP) – протокол выполняет надежную передачу пакетов, содержащих информацию о событии, и минимизирует количество избыточных пакетов [16]. После того

как сенсорный узел обнаружил событие, он отправляет пакет с информацией о нем на узел следующего скачка, этот узел сохраняет пакет в свой буфер, а затем передает на следующий скачок. Когда передавший информацию узел «слышит», что узел следующего скачка передает отправленный им пакет, то он воспринимает это как неявное подтверждение о успешной отправке. Затем узел удаляет пакет из очереди и обрабатывается следующий пакет. Преимущества – достоверная передача информации о событии, протокол минимизирует избыточную передачу пакетов данных. Недостаток – менее энергоэффективен по сравнению с другими протоколами.

COLLaborative Event deteCtion and Tracking (COLLECT) protocol – протокол включает в себя три процедуры [12, 17]:

- процедура разбиения – сенсорные узлы в области возникновения события объединяются в логические треугольники;
- процедура определения события – сенсорный узел определяет место возникновения события принимая сообщения от датчиков, в границах логических треугольников;
- процедура определения границ – выполняется выбор граничных датчиков для определения границы области возникновения события.

Преимущества – полностью распределенная структура протокола, сенсор мгновенно обнаруживает и отслеживает событие. Недостаток – не экономичен.

Reliable Energy Aware Routing (REAR) Protocol – в протоколе каждый сенсорный узел подтверждает успешную передачу данных другим узлам при помощи взаимодействия DATA-ACK [17]. Блок управления отправляет ACK пакет сенсорным узлам, который указывает, что пакет с информацией о событии успешно принят. Если сенсорный узел принимает пакет в течение таймаута, то он начинает передачу нового пакета. Преимущество – обеспечивает эффективную маршрутизацию. Недостаток – дополнительные энергозатраты из-за использования очередей и оценок.

Efficient Event Detection Protocol (EEDP) – задача протокола – своевременная передача пакета с информацией о событии от сенсорного узла в блок управления или приемник данных с наименьшим трафиком [17]. В основе протокола лежат две процедуры: процедура первичного обнаружения и процедура аварийной маршрутизации. Процедура первичного обнаружения – это процедура точного определения на основе правил принятия решения произошло событие или нет. Процедура аварийной маршрутизации – это процедура передачи пакета в приемник с использованием «жадного» алгоритма, для обеспечения достоверности при этом используется простая динамическая схема с несколькими копиями данных.

Преимущества – точное обнаружение событий, на приемник или базовую станцию не пересылается значительный объем данных. Недостаток – низкая надежность, поскольку только один узел принимает решения и отправляет информацию о событии в приемник.

Stop-and Wait-Implicit Acknowledgement (SWIA) Protocol – протокол ограничивает передачу сенсорным узлом следующего пакета, до тех пор, пока он получит ACK пакет для предыдущего отправленного пакета [18]. В протоколе применяется механизм неявного подтверждения, использующий широковещательный характер БСС. Узел датчика после передачи пакета прослушивает канал и тем самым уменьшает сетевой трафик. Преимущества – нет дополнительного заголовочного пакета, сокращение трафика, пакеты событий, которые не востребованы, не передаются. Недостаток – использование механизма неявного подтверждения приводит к задержкам в сети.

Energy Efficient-Low Latency Express Routing Protocol (EELLER) – протокол относится к категории иерархических протоколов маршрутизации [18]. Он использует метод кластеризации для минимизации количества скачков, необходимых для передачи данных, а также достижения высокой энергоэффективности. Когда событие обнаружено, данные о нем передаются скачок за скачком через вершины кластеров. В иерархической маршрутизации узлы с большим запасом энергии используются для отправки информации, а узлы с низким запасом используются только для детектирования события. Преимущества – энергоэффективность, накопление данных приводит к большей точности обнаружения событий. Недостаток – менее надежный.

Information Quality Aware Routing (IQAR) Protocol – в отличие от других схем протокол учитывает информацию о событии во время агрегации и пересылки данных [18]. Протокол использует подход, основанный на построении деревьев транзакций. Достоверность данных зависит от точности информации о событии. В этом протоколе каждый сенсорный узел независимо обнаруживает и собирает данные о событии и для каждой выборки принимает бинарное решение, которое ис-

пользуется для проверки того, произошло ли это событие или нет. Если произошло событие, результатом бинарного решения для выборки будет 1, иначе это будет 0.

Threshold sensitive Energy Efficient Network protocol (TEEN) – протокол TEEN – иерархический протокол, который группирует сенсорные узлы в кластеры с выбором вершины кластера [18]. При этом используется несколько иерархических уровней кластеров со своими вершинами. На каждом уровне вершина агрегирует данные и передает вершине более высокого уровня. TEEN оптимизирован для отслеживания быстроизменяющихся величин. Вершина кластера передает пороговые значения *hard* («жесткий») и *soft* («мягкий») другим узлам. «Жесткий» порог – это минимальное значение, при котором сенсорный узел, включит свой передатчик. Когда сенсорный узел измеряет величину, которая находится на уровне «жесткого» порогового значения или превышает его, он начинает передачу данных только тогда, когда значение этой величины изменяется, а изменение равно или больше, чем «мягкий» порог. Эта стратегия направлена на уменьшение затрат энергии на передачу сообщений.

Основным недостатком является то, что если контролируемое значение не достигнет порогового уровня, то, пользователь не получит никакой информации. Таким образом, данный алгоритм не применим для приложений, где передача информации должна быть регулярна.

Adaptive Periodic Threshold Sensitive Energy Efficient Sensor Network protocol (APTEEN) – протокол APTEEN является развитием протокола TEEN [18]. Его архитектура аналогична архитектуре TEEN, но при этом сенсорные узлы и периодически передают данные и реагируют на любое внезапное изменение значения измеряемого параметра. Агрегация данных выполняется вершиной кластера. APTEEN использует три типа запросов: исторический для анализа предыдущих значений; единовременный для получения моментального снимка сети и постоянный для контроля событий в течение определенного периода времени.

Sensor Protocols for Information via Negotiation (SPIN) protocol – в основе протокола лежит использование дескрипторов высокого уровня – «метаданных» для описания передаваемых данных [18]. Узлы обмениваются между собой «метаданными» через механизм «переговоров». Каждый узел, когда получает новые данные, сообщает об этом своим соседям, и если кто-то из соседей заинтересован в получении этих данных, то он, может их получить, отправив сообщение с соответствующим запросом. Но информацию о данных получают все узлы сети, даже если они ее не запрашивали.

Недостатком протокола является то, что он не гарантирует доставку данных, поэтому не подходит для приложений, которые требуют надежной периодической доставки пакетов данных.

По результатам проведенного анализа была составлена сводная таблица базовых характеристик рассмотренных протоколов (табл. 1).

Таблица 1

Базовые характеристики протоколов

Протокол	Sink-centric	Node-centric	Надежный	Контроль перегрузки	Энерго-эффективность	Устойчивость к потерям данных	Восстановление потерь
1	2	3	4	5	6	7	8
ESRT	да	нет	V				Весь маршрут
LTRES	да	нет		V		ACK/NACK	Весь маршрут
RRRT	да	нет	V			SACK	Весь маршрут
SMESRT	да	нет	V			ACK/NACK	Весь маршрут
CODAC	да	нет	V	V			Весь маршрут
DST	да	нет		V			Весь маршрут
OEDSR	да	нет			V	ACK/NACK	Весь маршрут
(RT)2	да	нет			V	SACK	Весь маршрут
ERP	нет	да	V			iACK	На каждом скачке
COLLECT	нет	да	V				На каждом скачке
REAR	нет	да	V			ACK	
EEDP	нет	да		V			На каждом скачке

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8
SWIA	да	нет		V			На каждом скачке
EELLER	нет	да			V		На каждом скачке
IQAR	нет	да			V		На каждом скачке
TEEN and APTEEN	да	нет			V		Весь маршрут
LTRES	да	нет		V		ACK/NACK	Весь маршрут
SPIN	нет	да			V		На каждом скачке

Заключение

Представленный обзор протоколов не претендует на полноту. Он лишь демонстрирует возможности того или иного протокола при построении беспроводных сенсорных сетей, активируемых событием. Выбор того или иного протокола является многокритериальной задачей, которая решается исходя из энергетических возможностей сенсоров, требуемого времени доставки и достоверности принимаемых данных. Современные протоколы обмена, которые являются развитием базового протокола LEACH, позволяют оптимизировать один или несколько параметров передачи данных, являющихся критическими для данного конкретного приложения.

Библиографический список

1. Адамов, А. П. Способ надежного питания элементов сенсорной сети от беспроводного интерфейса / А. П. Адамов, С. Г. Семенцов // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 1 (21). – С. 79–83.
2. Адамов, А. П. Классификация состояний беспроводной сенсорной сети с использованием методов машинного обучения / А. П. Адамов, А. А. Адамова, М. Н. Юлдашев // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем (МЭС). – 2016. – № 2. – С. 248–251.
3. Адамов, А. П. Методы обеспечения надежности в беспроводных сенсорных сетях по критерию сетевой нагрузки / А. П. Адамов, А. А. Адамова, М. Н. Юлдашев // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2016. – Т. 1. – С. 197–199.
4. Власов, А. И. Визуальные модели синтеза эффективных энергосистем / А. И. Власов // Энергосбережение и эффективность в технических системах : материалы V Междунар. науч.-техн. конф. студентов, молодых ученых и специалистов. – 2018. – С. 90–92.
5. Исследование методов синтеза распределенных сенсорных систем по критерию минимизации сетевой нагрузки / А. А. Адамова, А. Н. Алфимцев, А. И. Власов, С. Г. Семенцов, Т. А. Цивинская, М. Н. Юлдашев. – М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2017. – 75 с.
6. Ahuja, R. K. Network Flows: Theory, Algorithms, and Applications / R. K. Ahuja, T. L. Magnanti, J. B. Orlin. – New Jersey : Prentice Hall, 1993.
7. Akyildiz, F. Wireless sensor and actor networks: research challenges / F. Akyildiz, I. H. Kasimoglu // Ad Hoc Networks. – 2004. – № 2 (4). – P. 351–367.
8. Conti, M. Cross-layering in mobile ad hoc network design / M. Conti, S. Giordano, G. Maselli, G. Turi // IEEE Computer. – 2004. – № 37 (2). – P. 48–51.
9. Dressler, F. Self-Organization in Sensor and Actor Networks / F. Dressler. – New York : John Wiley & Sons, Ltd, 2007.
10. Akyildiz, I. F. Wireless Sensor Networks / I. F. Akyildiz, Mehmet Can Vuran. – New York : John Wiley & Sons, Ltd, 2010.
11. Aspnes, J. A theory of network localization / J. Aspnes, W. Whiteley, Y. R. Yang // IEEE Transactions on Mobile Computing. – 2006. – № 5 (12). – P. 1663–1678.
12. Taruna, S. Event Driven Routing Protocols For Wireless Sensor Network / S. Taruna, Megha R. Tiwari, S. Shringi // International Journal on Computational Sciences & Applications (IJCSA). – 2013. – Vol. 3, № 2.
13. Manjeshwar, A. TEEN: A Routing Protocol for Enhanced Efficiency in Wireless Sensor Networks / A. Manjeshwar, D. P. Agrawal // International Parallel & Distributed Processing Symposium. – 2001. – P. 1–7.
14. Vehbi, C. G. A Real-Time and Reliable Transport (RT)² Protocol for WSN and Actor Networks / C. G. Vehbi, B. A. Ozgur, Ian F. Akyildiz // IEEE/ACM Transactions On Networking. – 2008. – Vol. 16, № 2. – P. 359–370.
15. Javier, L. Routing Protocols in Wireless Sensor Networks / L. Javier, G. Villalba, A. L. Sandoval Orozco // Sensors. – 2009. – № 9. – P. 8399–8421.

References

1. Adamov A. P., Sementsov S. G. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem* [Reliability and quality of complex systems]. 2018, no. 1 (21), pp. 79–83.
2. Adamov A. P., Adamova A. A., Yuldashev M. N. *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nano-elektronnykh sistem (MES)* [Problems of development of perspective micro-and nanoelectronic systems (MES)]. 2016, no. 2, pp. 248–251.
3. Adamov A. P., Adamova A. A., Yuldashev M. N. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2016, vol. 1, pp. 197–199.
4. Vlasov A. I. *Energoberezhenie i effektivnost' v tekhnicheskikh sistemakh: materialy V Mezhdunar. nauch.-tekh. konf. studentov, molodykh uchenykh i spetsialistov* [Energy saving and efficiency in technical systems: materials V international. scientific.- techn. Conf. students, young scientists and specialists]. 2018, pp. 90–92.
5. Adamova A. A., Alfimtsev A. N., Vlasov A. I., Sementsov S. G., Tsvinskaya T. A., Yuldashev M. N. *Issledovanie metodov sinteza raspredelennykh sensornykh sistem po kriteriyu minimizatsii setevoy nagruzki* [Study of methods of synthesis of distributed sensor systems by the criterion of minimizing the network load]. Moscow: MGTU im. N. E. Baumana, 2017, 75 p.
6. Ahuja R. K., Magnanti T. L., Orlin J. B. *Network Flows: Theory, Algorithms, and Applications*. New Jersey: Prentice Hall, 1993.
7. Akyildiz F., Kasimoglu I. H. *Ad Hoc Networks*. 2004, no. 2 (4), pp. 351–367.
8. Conti M., Giordano S., Maselli G., Turi G. *IEEE Computer*. 2004, no. 37 (2), pp. 48–51.
9. Dressler F. *Self-Organization in Sensor and Actor Networks*. New York: John Wiley & Sons, Ltd, 2007.
10. Akyildiz I. F., Mehmet Can Vuran *Wireless Sensor Networks*. New York: John Wiley & Sons, Ltd, 2010.
11. Aspnes J., Whiteley W., Yang Y. R. *IEEE Transactions on Mobile Computing*. 2006, no. 5 (12), pp. 1663–1678.
12. Taruna S., Tiwari Megha R., Shringi S. *International Journal on Computational Sciences & Applications (IJCSA)*. 2013, vol. 3, no. 2.
13. Manjeshwar A., Agrawal D. P. *International Parallel & Distributed Processing Symposium*. 2001, pp. 1–7.
14. Vehbi C. G., Ozgur B. A., Akyildiz Ian F. *IEEE/ACM Transactions On Networking*. 2008, vol. 16, no. 2, pp. 359–370.
15. Javier L., Villalba G., Sandoval Orozco A. L. *Routing Protocols in Wireless Sensor Networks*. 2009.

Адамов Александр Петрович

доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РД,
кафедра микроэлектроники,
Дагестанский государственный
технический университет
(367026, Дагестан, г. Махачкала, ул. И. Шамиля, 70)
E-mail: info@iu4.bmstu.ru

Адамова Арина Александровна

кандидат технических наук, доцент,
кафедра проектирования и технологии
производства электронной аппаратуры,
Московский государственный технический
университет им. Н. Э. Баумана
(105005, Россия, г. Москва, 2-ая Бауманская 5, стр. 1)
E-mail: arina.adamova@rambler.ru

Семенцов Станислав Григорьевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра проектирования и технологии
производства электронной аппаратуры,
Московский государственный технический
университет им. Н. Э. Баумана
(105005, Россия, г. Москва, 2-ая Бауманская 5, стр. 1)
E-mail: siemens_off@mail.ru

Adamov Aleksandr Petrovich

doctor of technical sciences, professor,
honored worker of science RD,
sub-department of microelectronics,
Dagestan State Technical University
(367026, 70 I. Shamil street, Makhachkala, Dagestan)

Adamova Arina Alexandrovna

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of design and production technology
of electronic equipment,
Bauman Moscow State Technical University
(105005, p. 1, 5 2nd Baumanskaya street,
Moscow, Russia)

Sementsov Stanislav Grigorievich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of design and production technology
of electronic equipment,
Bauman Moscow State Technical University
(105005, p. 1, 5 2nd Baumanskaya street,
Moscow, Russia)

Темиров Алибулат Темирбекович

кандидат технических наук, доцент,
декан факультета радиоэлектроники,
телекоммуникаций и мультимедийных технологий,
Дагестанский государственный
технический университет
(367026, Дагестан, г. Махачкала, ул. И. Шамиля, 70)
E-mail: ali.temirov@rambler.ru

Temirov Alibulat Temirbekovich

candidate of technical sciences, associate professor,
dean of the faculty of radio electronics,
telecommunications and multimedia technologies,
Dagestan State Technical University
(367026, 70 I. Shamil street, Makhachkala, Dagestan)

УДК 621.316**Адамов, А. П.**

**Протоколы обмена в беспроводных сенсорных сетях регистрации событий / А. П. Адамов,
А. А. Адамова, С. Г. Семенцов, А. Т. Темиров // Надежность и качество сложных систем. – 2018. –
№ 3 (23). – С. 124–132. – DOI 10.21685/2307-4205-2018-3-15.**

БЕЗОПАСНОСТЬ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

SAFETY IN EMERGENCY SITUATIONS

УДК 81.92

DOI 10.21685/2307-4205-2018-3-16

Б. Ф. Безродный, И. Ф. Безродный, А. С. Виноградов

ОПТИМИЗАЦИЯ ПОРЯДКА ПРИМЕНЕНИЯ СРЕДСТВ И МЕРОПРИЯТИЙ ОБЕСПЕЧЕНИЯ АБСОЛЮТНОЙ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТА

B. F. Bezrodnyy, I. F. Bezrodnyy, A. S. Vinogradov

STREAMLINING USE OF FUNDS AND ACTIVITIES ENSURING THE ABSOLUTE FIRE SAFETY OF THE OBJECT

Аннотация. *Актуальность и цели.* Вероятность возникновения пожара на том или ином объекте является объективной величиной, характеризующей степень его пожарной опасности. В отличие от известного многим пожарного риска, расчет которого проводится по сомнительным методикам, не прошедшим даже минимальной апробации в реальных условиях, статистические данные не могут быть опровергнуты по желанию какого-либо оппонента. Актуальность имеет под собой и экономическую составляющую: требования по оснащению объекта защиты специальными устройствами, начиная от датчиков пожарной сигнализации (самый минимум) и заканчивая автоматическими установками пожаротушения как максимум, требуют порой существенных финансовых затрат. При этом нормативные документы, регламентирующие вопросы оснащения системами, до настоящего времени не учитывают вероятность возникновения пожара. *Материалы и методы.* На основе вероятностно-игровой модели предложен метод определения (оценки) оптимальных значений частот (вероятностей) применения средств и мероприятий для обеспечения полной (абсолютной) пожарной безопасности объекта на основе максимизации вероятности реализации такой ситуации, как с учетом проявления различных дестабилизирующих факторов, так и без него. *Результаты.* Предложенный метод моделирования позволил установить связь между вероятностью

Abstract. *Background.* The probability of fire at a particular facility is an objective value, which characterizes its degree of fire hazard. Unlike many known fire risk, the calculation of which is held by questionable methods have not been even minimal testing in real conditions, statistical data cannot be refuted at the request of any opponent. Topicality is and economic component: requirement to equip protection object special devices, ranging from fire alarm sensors is the minimum, and ending automatic fire extinguishing installations-as maximum, require sometimes significant financial costs. While regulations governing equipment systems, thus far, do not take into account the likelihood of fire. *Materials and methods.* Based on the probabilistic model slot method definitions (evaluation) the optimal values of the frequency (probability) of tools and activities to ensure the full (absolute) fire safety object based on the maximization of the probability the realization of such a situation, both in view of the various manifestations of destabilizing factors, and without it. The probability of fire at a particular facility is an objective value, which characterizes its degree of fire hazard. Unlike many known fire risk, the calculation of which is held by questionable methods have not been even minimal testing in real conditions, statistical data cannot be refuted at the request of any opponent. Topicality is and economic component: requirement to equip protection object special devices, ranging from fire alarm sensors is the minimum, and ending automatic fire

стью возникновения пожара на объекте, входящем в выборку однотипных объектов защиты, опыт эксплуатации которых позволяет оперировать надежными, обоснованными и объективными данными о пожарной опасности. В качестве максимальной задачи показана возможность технико-экономического обоснования того или иного способа обеспечения пожарной безопасности, соответствующих мероприятий и в конечном итоге оптимизации финансовых затрат на безопасность. *Выводы.* Отсутствие учета объективных статистических данных по пожарам и загораниям на объектах защиты в требованиях нормативных документов о пожарной опасности приводит зачастую к излишним затратам на обеспечение пожарной безопасности. Оптимизация этих затрат, вплоть до полного обнуления, возможна на основании объективных статистических данных с использованием вероятностно-игровой модели.

Ключевые слова: система пожарной безопасности (ПБ), риск возникновения пожара, установка пожаротушения, функциональный цикл, полное обеспечение ПБ, инновации, статистика пожаров.

extinguishing installations-as maximum, require sometimes significant financial costs. While regulations governing equipment systems, thus far, do not take into account the likelihood of fire. Materials and methods. Based on the probabilistic model slot method definitions (evaluation) optimal values (probabilities) application. *Results.* The proposed method of modeling revealed the relationship between the probability of a fire at the facility, which is included in the sample of similar objects of protection operation experience which allows to operate with reliable, reasonable and objective information about fire danger. In the maximum task shows the possibility of a feasibility study of a method of fire safety, and ultimately optimize financial costs of security. *Conclusions.* Lack of objective statistics on fires and zagoraniyam on the objects of protection requirements of regulatory documents on fire danger often leads to unnecessary costs of fire safety. Optimization of these costs until the reset is possible based on objective statistical data using a probabilistic game model.

Key words: the system of fire safety (FS), risk of the fire, fire extinguishing systems, the functional cycle, the full support of FS, innovations, statistics of fires.

В настоящее время особую актуальность приобретает оперативная коррекция как набора средств и мероприятий, используемых для обеспечения пожарной безопасности, так и порядка использования его вариантов, с целью достижения максимума вероятности полного или абсолютного обеспечения пожарной безопасности (ПБ). Поэтому данная статья посвящена разработке методики определения оптимального, в смысле максимума вероятности обеспечения ПБ, порядка применения различных вариантов набора средств и мероприятий.

Для расчета вероятностей полного обеспечения ПБ с учетом условных (при условии использовании определенных средств и мероприятий) вероятностей их воздействия на уровень ПБ, а также безусловных вероятностей, как применения сотрудниками службы пожарной безопасности средств и мероприятий, так и проявления различных дестабилизирующих пожарную безопасность факторов, можно воспользоваться следующими формулами:

$$P(A_i) = \sum_{j=1}^{k_i} P(A_i | B_{ij})P(B_{ij}) = \sum_{j=1}^{k_i} r_{ij}q_{ij}, \tag{1}$$

где $r_{ij} = P(A_i | B_{ij})$ – условная вероятность полного обеспечения ПБ i -го участка объекта, при условии выбора для обеспечения j -го набора средств и мероприятий, а $q_{ij} = P(B_{ij})$ – безусловная вероятность выбора из возможных вариантов j -го набора средств и мероприятий для обеспечения безопасности i -го участка объекта, т.е. частота, с которой он выбирается:

$$P = \prod_{i=1}^n \left[\sum_{j=1}^{k_i} P(A_i | B_{ij})P(B_{ij}) \right] = \prod_{i=1}^n \left[\sum_{j=1}^{k_i} r_{ij}q_{ij} \right], \tag{2}$$

$$P(A_i) = \sum_{j=1}^{k_i} \sum_{t=1}^{n_i} P(A_i | B_{ij} | \Pi_{it})P(B_{ij})P(\Pi_{it}) = \sum_{j=1}^{k_i} \sum_{t=1}^{n_i} d_{ijt}q_{ij}w_{it}, \tag{3}$$

$$P = \prod_{i=1}^N \left[\sum_{j=1}^{k_i} \sum_{t=1}^{n_i} P(A_i | B_{ij} | \Pi_{it})P(B_{ij})P(\Pi_{it}) \right] = \prod_{i=1}^N \left[\sum_{j=1}^{k_i} \sum_{t=1}^{n_i} d_{ijt}q_{ij}w_{it} \right]. \tag{4}$$

Вероятность $w_{it} = P(\Pi_{it})$ определяет частоту проявления на i -м участка объекта t -го варианта набора факторов, дестабилизирующих пожарную безопасность (ПБ).

Вышеупомянутые условные вероятности полного обеспечения ПБ $r_{ij} = P(A_i | B_{ij})$ и $d_{ijt} = P(A_i | B_{ij} | \Pi_{it})$ могут быть вычислены с использованием известных моделей и методик [1] и в конечном итоге сводятся в таблицы, а безусловные вероятности $P(B_{ij}) = q_{ij}$ и $P(\Pi_{it}) = w_{it}$ ($i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, k_i; t = 1, \dots, n_i$) являются в общем случае варьируемыми величинами (переменными). При этом их значения следует выбирать в рамках общепринятого математического подхода, ориентируясь на наихудший с точки зрения критерия эффективности вариант, рассматривая их либо как антагонистически управляемые переменные, либо по ним необходимо усреднять критерий эффективности, когда мы их в силу априорной неопределенности считаем случайными факторами [2]. В итоге на них накладываются ограничения, естественные для вероятностей событий, образующих полную группу, т.е.

$$0 \leq w_{it} \leq 1; t = 1, \dots, n_i; \sum_{t=1}^{n_i} w_{it} = 1, \text{ для любого } i = 1, \dots, N. \quad (5)$$

Напротив, выбор оптимальных значений величин q_{ij} , максимизирующих критерий эффективности, составляет в конечном итоге суть процесса оптимизации порядка выбора из возможных вариантов набора средств и мероприятий обеспечения ПБ, используемых сотрудниками службы пожарной безопасности при полном обеспечении ПБ объекта и его отдельных участков.

На них, аналогично (5), следует наложить естественные ограничения:

$$0 \leq q_{ij} \leq 1; j = 1, \dots, n_i; \sum_{j=1}^{n_i} q_{ij} = 1, \text{ для любого } i = 1, \dots, N. \quad (6)$$

Основную сложность при постановке задачи оптимизации порядка применения различных наборов средств и мероприятий обеспечения ПБ, используемых сотрудниками службы пожарной безопасности при полном обеспечении ПБ объекта, представляет задание стоимостных ограничений. Дело в том, что множества вариантов наборов средств и мероприятий обеспечения ПБ, используемые для обеспечения ПБ на различных участках объекта, могут как не пересекаться или пересекаться, так и просто совпадать. Данный факт обуславливает возможность использования одного и того же варианта наборов средств и мероприятий при обеспечении полной ПБ на различных участках объекта, что в свою очередь затрудняет оценку общей стоимости применяемого на различных участках варианта набора средств и мероприятий обеспечения ПБ. Это значительно усложняет формализацию получения такой оценки и приводит к оптимизационной задаче, разрешимой в общем случае лишь путем полного перебора всех различных вариантов набора средств и мероприятий обеспечения полной ПБ в дискретном случае (величины q_{ij} изменяются с некоторым фиксированным дискретом), а при непрерывном изменении вероятностей q_{ij} – становится численно практически неразрешимой [3]. Поэтому для преодоления возникшей вышеописанной трудности введем понятие удельной амортизационной стоимости каждого средства или мероприятия, используемого для обеспечения ПБ, что позволяет нам получить аддитивные ограничения стоимости используемых наборов средств и мероприятий обеспечения ПБ на каждом из участков защищаемого объекта.

Пусть C – стоимость конкретного, используемого сотрудниками службы пожарной безопасности средства или мероприятия обеспечения ПБ, т.е. затраты на его оснащение, документирование, подготовку специалистов для его осуществления и иные затраты, связанные с его подготовкой и реализацией; T – среднее время его использования при функционировании объекта или участка (например, продолжительность выполнения определенной функции объекта или участка), а t – предписанная нормативными документами или плановая периодичность применения рассматриваемого средства или мероприятия обеспечения ПБ, т.е. среднее время между актами его использования. Будем считать, что затраты на амортизацию средства или проведение мероприятия обеспечения

ПБ распределяются равномерно в течение всего срока функционирования объекта или участка. Такое допущение на практике является вполне приемлемым. Тогда удельная амортизационная стоимость однократного применения этого средства или мероприятия обеспечения ПБ можно оценить по формуле

$$C_{\text{уд}} = \frac{Ct}{T}. \quad (7)$$

Естественно, формула (7) является очень приближенной и упрощенной. Ее можно уточнить, вводя различные значения t для различных участков защищаемого объекта и наборов средств и мероприятий обеспечения ПБ. Однако смысл ее от этого не изменится. Таким образом, если мы сложим удельные амортизационные стоимости средств или мероприятий обеспечения ПБ, входящих в j -й вариант набора средств и мероприятий, используемый на i -ом участке защищаемого объекта, то получим удельную амортизационную стоимость c_{ij} j -го варианта набора средств и мероприятий для i -го участка защищаемого объекта. Учитывая безусловные вероятности q_{ij} применения j -го варианта набора средств и мероприятий на i -м участке защищаемого объекта, получаем стоимость C_i полного обеспечения пожарной безопасности i -го участка защищаемого объекта как ее математическое ожидание

$$C_i = \sum_{j=1}^{k_i} c_{ij} q_{ij}. \quad (8)$$

Тогда итоговую стоимость полного обеспечения пожарной безопасности защищаемого объекта можно посчитать по формуле

$$C = \sum_{i=1}^N C_i = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{k_i} c_{ij} q_{ij}. \quad (9)$$

Отметим, что необходимые данные для вычисления удельной амортизационной стоимости однократного применения конкретного средства или мероприятия обеспечения ПБ по формуле (7) или ее уточненному варианту (при необходимости учета специфики конкретного участка защищаемого объекта и конкретного варианта набора используемых средств и мероприятий обеспечения ПБ), как правило, содержатся в технико-экономических обоснованиях и сметах расходов на разработку и внедрение систем обеспечения ПБ. Это позволяет удельные амортизационные стоимости однократного применения средств и мероприятий обеспечения ПБ c_{ij} просто затабулировать.

Теперь приступим непосредственно к постановке задачи оптимизации порядка применения вариантов набора средств и мероприятий, обеспечивающих полную пожарную безопасность, на основе максимизации вероятности исключения возникновения пожара на объекте или участке объекта с учетом стоимостных ограничений путем выбора оптимальных значений безусловных вероятностей q_{ij} применения j -го варианта набора средств и мероприятий обеспечения ПБ на i -м участке объекта ($j = 1, \dots, k_i; i = 1, \dots, N$).

Итак, мы обозначили через P вероятность исключения возникновения пожара на защищаемом объекте, что соответствует полному обеспечению пожарной безопасности, а через C – стоимость набора средств и мероприятий обеспечения ПБ.

В качестве критерия эффективности набора средств и мероприятий обеспечения ПБ целесообразно выбрать вероятность исключения возникновения пожара на защищаемом объекте, что соответствует полному обеспечению пожарной безопасности P .

Остается обозначить через C_0 максимально допустимую величину стоимости набора средств и мероприятий обеспечения ПБ, определяемую из экономических возможностей службы обеспечения пожарной безопасности объекта. Тогда задача оптимизации будет иметь вид

$$P \rightarrow \max, \text{ при } C \leq C_0. \quad (10)$$

Если на практике появляется необходимость минимизировать стоимость набора средств и мероприятий, то следует задать минимально допустимую вероятность возникновения пожара на объекте (или участке объекта) P_0 , тогда задача оптимизации, двойственная к задаче (10), будет иметь вид

$$C \rightarrow \min, \text{ при } P \geq P_0. \quad (11)$$

Также при оценке эффективности набора средств и мероприятий обеспечения ПБ по широко известному [4] критерию эффективность/стоимость задача оптимизации преобразуется в

$$P / C \rightarrow \max. \quad (12)$$

Однако наиболее приемлемым с практической точки зрения критерием эффективности набора средств и мероприятий обеспечения ПБ является вероятность полного обеспечения ПБ, а задачу оптимизации порядка применения вариантов набора средств и мероприятий обеспечения ПБ наиболее целесообразно ставить в виде (10). Постановка ее в виде (11) целесообразна лишь в случае, когда имеют место значительные финансовые трудности, а значение P_0 близко к единице. Постановка оптимизационной задачи в виде (12) с точки зрения общепринятой теории оценки эффективности [3] является классикой, однако, с практической точки зрения, применительно к защите особо важных и ответственных объектов (например, оборонного назначения, атомной энергетики или оперативного управления) – малосодержательной. Такая постановка рассматриваемой оптимизационной задачи в целом ряде случаев приводит к оптимальным решениям, характеризуемым невысокой вероятностью полного обеспечения ПБ при относительно скромных затратах на функционирование всей системы обеспечения пожарной безопасности.

Учитывая формулы (2), (9) и ограничения (6), оптимизационная задача (10) принимает вид

$$P_{\max} = \max_{q_{ij}} \prod_{i=1}^N \left[\sum_{j=1}^{k_i} r_{ij} q_{ij} \right], \quad (13)$$

$$\text{при } \sum_{j=1}^{k_i} q_{ij} = 1; \quad \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{k_i} c_{ij} q_{ij} \leq C_o;$$

$$0 \leq q_{ij} \leq 1; \quad j = 1, \dots, k_i; \quad i = 1, \dots, N.$$

Постановка (13) оптимизационной задачи (10) соответствует случаю, когда проявление различных наборов дестабилизирующих факторов принимается случайным, а условная вероятность $P(A_i | B_{ij})$ успешного завершения i -го участка объекта при использовании сотрудниками службы пожарной безопасности j -го набора средств и мероприятий ПБ по вариантам проявления различных наборов дестабилизирующих факторов усредняется, т.е. $P(A_i | B_{ij})$ принимается равным математическому ожиданию вероятности $P(A_i | B_{ij} | \Pi_{it})$.

Если же такое усреднение не проводить, а принять игровую модель [5], при которой проявление различных наборов дестабилизирующих факторов не является случайным, а рассчитывается на наихудший случай (минимаксный подход, соответствующий модели антагонистической игры), то оптимизационная задача (10) с учетом формул (4), (9) и ограничений (5) и (6) примет вид

$$P_{\max} = \max_{q_{ij}} \min_{w_{it}} \prod_{i=1}^N \left[\sum_{j=1}^{k_i} \sum_{t=1}^{n_i} d_{ijt} q_{ij} w_{it} \right], \quad (14)$$

$$\text{при } \sum_{j=1}^{k_i} q_{ij} = 1; \quad \sum_{t=1}^{n_i} w_{it} = 1; \quad \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{k_i} c_{ij} q_{ij} \leq C_o;$$

$$0 \leq q_{ij} \leq 1; \quad 0 \leq w_{it} \leq 1; \quad j = 1, \dots, k_i; \quad t = 1, \dots, n_i; \quad i = 1, \dots, N.$$

Вместе с тем методики оценки условных вероятностей $P(A_i | B_{ij})$ и $P(A_i | B_{ij} | \Pi_{it})$ преимущественно основываются на экспертных оценках, а поэтому являются приближенными и имеют значительную погрешность. Поэтому жесткая рекомендация применения того или иного набора средств и мероприятий обеспечения ПБ не является оправданной, тем более, что на вероятность полного обеспечения ПБ могут влиять конкретные слабо формализуемые факторы и условия. Таким образом, в целом ряде случаев оказывается необходимо оценить степень предпочтения одного набора средств и мероприятий, по сравнению с другими, то есть оценить с какой частотой следует применять тот или иной набор средств и мероприятий обеспечения ПБ. Другими словами, следует оценить оптимальные значения безусловных вероятностей q_{ij} , для чего требуется решить оптимизационные задачи (13) и (14) в смешанных стратегиях:

$$(\ln P)_{\max} = \max_{q_{ij}} \sum_{i=1}^N \ln \left[\sum_{j=1}^{k_i} r_{ij} q_{ij} \right], \tag{15}$$

при $\sum_{j=1}^{k_i} q_{ij} = 1; \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{k_i} c_{ij} q_{ij} \leq C_0;$

$$0 \leq q_{ij} \leq 1; j = 1, \dots, k_i; i = 1, \dots, N.$$

$$(\ln P)_{\max} = \max_{q_{ij}} \min_{w_{it}} \sum_{j=1}^n \ln \sum_{i=1}^{k_j} \sum_{t=1}^{n_j} d_{ijt} q_{ij} w_{it}, \tag{16}$$

при $\sum_{j=1}^{k_i} q_{ij} = 1; \sum_{t=1}^{n_i} w_{it} = 1; \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{k_i} c_{ij} q_{ij} \leq C_0;$

$$0 \leq q_{ij} \leq 1; 0 \leq w_{it} \leq 1; j = 1, \dots, k_i; t = 1, \dots, n_i; i = 1, \dots, N.$$

Нами было проведено логарифмирование критерия оптимизации, позволившее получить аддитивный по участкам объекта критерий эффективности, каждое слагаемое которого зависит от безусловных вероятностей применения набора средств и мероприятий, обеспечивающих пожарную безопасность соответствующего участка защищаемого объекта, и представляет собой логарифм вероятности полного обеспечения ПБ участка. Далее распределим стоимостной ресурс C_0 , отведенный на функционирование набора средств и мероприятий, позволяющих обеспечить полную пожарную безопасность на всех участках объекта. Тогда задача оптимизации порядка применения обеспечивающих ПБ средств и мероприятий с учетом стоимостных ограничений при усредненном проявлении различных наборов дестабилизирующих пожарную безопасность объекта факторов представляется в виде суперпозиции задачи динамического программирования (распределения ресурсов):

$$(\ln P)_{\max} = \max_{c_1, \dots, c_N} \sum_{i=1}^N \phi_i(C_i), \tag{17}$$

при $C_1 + \dots + C_N = C_0;$

и задачи линейного программирования:

$$\phi_i(C_i) = \max_{q_{i1}, \dots, q_{ik_i}} \sum_{j=1}^{k_i} r_{ij} q_{ij}, \tag{18}$$

при $0 \leq q_{ij} \leq 1; \sum_{j=1}^{k_i} q_{ij} = 1; \sum_{j=1}^{k_i} c_{ij} q_{ij} = C_i.$

Посредством (18) при фиксированных C_i ($i = 1, \dots, N$) задается параметрическое по C_i семейство из N задач линейного программирования, решение которых позволяет определить оптимальный

в смысле максимизации вероятности P_i обеспечения полной пожарной безопасности i -го участка объекта набор безусловных вероятностей q_{i1}, \dots, q_{ik_i} :

$$\Phi_i(C_i) = \max_{q_{i1}, \dots, q_{ik_i}} \sum_{j=1}^{k_i} q_{ij} r_{ij}, \quad (19)$$

при $0 \leq q_{ij} \leq 1$; $\sum_{j=1}^{k_i} q_{ij} = 1$; $\sum_{j=1}^{k_i} c_{ij} q_{ij} \leq C_i$.

Отметим, что в отличие от задачи (19) в задаче (18) в стоимостном ограничении стоит равенство. Это обусловлено тем, что при решении в смешанных стратегиях вероятности q_{ij} изменяются не дискретно («0» или «1»), а непрерывно, в результате чего, с одной стороны, равенство всегда достигается, а с другой – из теории линейного программирования следует, что оптимум лежит на границе симплекса, вычленяемого ограничениями (две гиперплоскости) в $R_+^{k_i}$, что означает возможность использования стоимостного ограничения в виде равенства.

При решении задачи (19) в чистых стратегиях было доказано, что стоимостное ограничение C_i с точки зрения возможности получения различных оптимальных стратегий $J_i^{\text{опт}}(C_i)$ могут принимать k_i значений из множества удельных амортизационных стоимостей $\{c_{i1}, \dots, c_{ik_i}\}$.

В случае решения задачи (18), т.е. оптимизации в смешанных стратегиях, изменение ограничения C_i в общем случае является непрерывным, но его увеличение на величину $C_i^* = \max_{j=1, \dots, k_i} c_{ij}$ не имеет смысла, поскольку такому ограничению соответствует решение задачи (18) в чистых стратегиях $J_i^{\text{опт}}(C_i^{\text{опт}})$, определяемой условием

$$r_{ij_i^{\text{опт}}(C_i^*)} = \max_{j=1, \dots, k_i} r_{ij}. \quad (20)$$

Таким образом, областью целесообразного изменения стоимостного ограничения C_i является отрезок $[0, C_i^*]$. Данный факт следует учесть при решении задачи (17) методом динамического программирования с целью снижения вычислительных затрат на его реализацию.

Для численного решения задачи линейного программирования (18) воспользуемся алгоритмом симплекс-метода [Л. 6]. Поскольку симплекс, высекаемый из $R_+^{k_i}$ двумя плоскостями – ограничениями, в силу $c_{ij} \geq 0$ является выпуклым, то согласно теории линейного программирования [6] решение $\{q_{i1}^{\text{опт}}(C_i), \dots, q_{ik_i}^{\text{опт}}(C_i)\}$ задачи (18) существует и определяется с помощью алгоритма симплекс-метода однозначно за конечное число шагов. В результате решение задачи (18) запишем в виде

$$\Phi_i(C_i) = \max_{q_{i1}, \dots, q_{ik_i}} \sum_{j=1}^{k_i} r_{ij} q_{ij} = \sum_{j=1}^{k_i} r_{ij} q_{ij}^{\text{опт}}(C_i), \quad (21)$$

где $0 \leq q_{ij} \leq 1$; $\sum_{j=1}^{k_i} q_{ij} = 1$; $\sum_{j=1}^{k_i} c_{ij} q_{ij} = C_i$; $c_{ij} \geq 0$.

Соотношение (21) однозначно определяет функцию $\Phi_i(C_i)$. После такого ее определения можно приступить к решению задачи динамического программирования (17), которая с учетом принципа оптимальности Беллмана преобразуется к виду

$$\begin{aligned} (\ln P)_{\max} &= \max_{C_1} F_1(C_1); \\ F_i(C_i) &= \ln \Phi_i(C_i) + \max_{C_{i+1}} F_{i+1}(C_{i+1}); \end{aligned} \quad (22)$$

$$i = 1, \dots, N - 1; F_N = \ln \Phi_N(C_N); C_1 + \dots + C_N = C_0.$$

Задача (22) является классической задачей динамического программирования [7]. Однако примененный нами для решения подобной задачи (23)

$$(\ln P)_{\max} = \max_{C_1} F_1(C_1); \tag{23}$$

$$F_i(C_i) = \ln \phi_i(C_i) + \max_{C_{i+1}} F_{i+1}(C_{i+1});$$

$$i = 2, \dots, N-1; F_N = \max_{C_N} \ln \phi_N(C_N).$$

При оптимизации набора средств и мероприятий обеспечения ПБ в чистых стратегиях алгоритм Беллмана применим в классическом случае для конечных множеств изменения C_i , которые были определены при решении задачи (19). В случае задачи (22) область изменения C_i является отрезком $[0, C_i^*]$, который является ограниченным, но не дискретным множеством. Решение задачи динамического программирования численным методом [7] в случае непрерывного изменения C_i является крайне трудоемкой вычислительной задачей [9]. Однако следует отметить, что удельные амортизационные стоимости c_{ij} вычисляются с некоторой погрешностью и с достаточной степенью экспертной условности. Поэтому в непрерывном изменении C_i на практике смысла нет, тем более что и денежное исчисление имеет явную дискретность. Так, например, суммы, как правило, округляются до рублей. Таким образом, можно ввести дискрет изменения стоимостей δ_c . После введения такого дискрета, множество изменений C_i становятся дискретными и конечными, что позволяет применить для решения задачи динамического программирования (17) классический алгоритм Беллмана [10] и получить при этом решение оптимизационной задачи (13) с достаточной для практики точностью. Другими словами, решением оптимизационной задачи (17)–(18) будет набор безусловных вероятностей $\{q_{i1}^{\text{опт}}(C_i^{\text{опт}}), \dots, q_{ik_i}^{\text{опт}}(C_i^{\text{опт}})\}$, $i = 1, \dots, N$, где $\{C_1^{\text{опт}}, \dots, C_N^{\text{опт}}\}$ – решение задачи (17), а $\{q_{i1}^{\text{опт}}(C_i^{\text{опт}}), \dots, q_{ik_i}^{\text{опт}}(C_i^{\text{опт}})\}$ – соответствующие ему решения семейства задач (18).

Остается уточнить, из каких соображений выбирать δ_c . Определение c_{ij} с точностью 5–10 % является вполне допустимым на практике. Поэтому можно в качестве дискрета изменения стоимостей применять величину

$$\delta_c = 0,1 \min c_{ij}; i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, k_i. \tag{24}$$

Приступим, наконец, к решению в смешанных стратегиях задачи (14), т.е. к оптимизации порядка применения обеспечивающих полную пожарную безопасность наборов средств и мероприятий ПБ с учетом проявления дестабилизирующих пожарную безопасность объекта факторов.

Так же, как и задача (13), она записывается в виде задачи распределения ресурсов (17)–(18). Оптимизационную задачу (14) запишем в виде суперпозиции задачи динамического программирования:

$$(\ln P)_{\max} = \max_{C_1, \dots, C_N} \sum_{i=1}^N \Psi_i(C_i) \tag{25}$$

при $C_1 + \dots + C_N = C_0$;

и задачи отыскания нижней цены матричной игры:

$$\Psi_i(C_i) = \max_{q_{i1}, \dots, q_{ik_i}} \min_{w_{i1}, \dots, w_{ik_i}} \sum_{j=1}^{k_i} \sum_{t=1}^{n_i} d_{ijt} q_{ij} w_{it} \tag{26}$$

при

$$0 \leq q_{ij} \leq 1; 0 \leq w_{it} \leq 1; \sum_{j=1}^{k_i} q_{ij} = 1; \sum_{t=1}^{n_i} w_{it} = 1; \sum_{j=1}^{k_i} c_{ij} q_{ij} = C_i.$$

Задачу (26) от классической матричной игры отличает лишь наличие стоимостного ограничения, что в общем случае может привести к уменьшению области допустимых значений вероятностей q_{ij} , и к отличию решения задачи (26) от решения классической матричной игры из (26) без этого ограничения. Поэтому задачу (26) следует решать методом последовательного решения задач линейного программирования [11]. Таким образом, наборы значений безусловных вероятностей $\{q_{i1}^{\text{опт}}(C_i), \dots, q_{ik_i}^{\text{опт}}(C_i)\}$ и $\{w_{i1}^{\text{опт}}(C_i), \dots, w_{in_i}^{\text{опт}}(C_i)\}$, являющиеся решением матричной игры (26), однозначно определяют функцию

$$\Psi_i(C_i) = \sum_{j=1}^{k_i} \sum_{i=1}^{n_i} d_{ij} q_{ij}^{\text{опт}}(C_i) w_{ij}^{\text{опт}}(C_i). \quad (27)$$

После чего с учетом изложенной выше дискретизации стоимостных ограничений остается с помощью классического алгоритма Беллмана [7] решить задачу динамического программирования (25), переписав ее в виде

$$\begin{aligned} (\ln P)_{\max} &= \max_{C_1} G_1(C_1); \\ G_i(C_i) &= \ln \Psi_i(C_i) + \max_{C_{i+1}} G_{i+1}(C_{i+1}); \\ i &= 1, \dots, N-1; G_N = \ln \Psi_N(C_N); C_1 + \dots + C_N = C_0. \end{aligned} \quad (28)$$

Многократно решая задачу (26), определяется семейство по C_1, \dots, C_N оптимальных смешанных стратегий $\{q_{i1}^{\text{опт}}(C_i), \dots, q_{ik_i}^{\text{опт}}(C_i)\}$; $\{w_{i1}^{\text{опт}}(C_i), \dots, w_{in_i}^{\text{опт}}(C_i)\}$; $i = 1, \dots, N$, применение набора средств и мероприятий, обеспечивающих полную пожарную безопасность на всех участках защищаемого объекта.

В результате получаем оптимальное решение задачи (14):

$$\begin{aligned} &\{C_1^{\text{опт}}, \dots, C_N^{\text{опт}}\}; \\ &\{q_{i1}^{\text{опт}}(C_i^{\text{опт}}), \dots, q_{ik_i}^{\text{опт}}(C_i^{\text{опт}})\}; \{w_{i1}^{\text{опт}}(C_i^{\text{опт}}), \dots, w_{in_i}^{\text{опт}}(C_i^{\text{опт}})\}; \\ &i = 1, \dots, N. \end{aligned}$$

Заключение

Предложенная методика позволяет определить оптимальные с точки зрения максимизации вероятности полного обеспечения пожарной безопасности объекта, т.е. исключения возникновения пожара, частоты (вероятности) использования различных наборов средств и мероприятий обеспечения ПБ, как с учетом проявления дестабилизирующих пожарную безопасность факторов, так и без него.

Библиографический список

1. Школьников, А. Д. Основы теории игр / А. Д. Школьников. – Л., 1970.
2. Горелик, В. А. Теория игр и исследование операций / В. А. Горелик. – М., 1978.
3. Вентцель, Е. С. Исследование операций. Задачи. Принципы. Методология / Е. С. Вентцель. – М.: Наука, 1988.
4. Шерстобитов, В. В. Математическое программирование / В. В. Шерстобитов. – Л., 1970. – Ч. 2.
5. Шерстобитов, В. В. Математическое программирование / В. В. Шерстобитов. – Л., 1969. – Ч. 1.
6. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. – М.: Высш. шк., 1998.
7. Юрков, Н. К. Риски отказов сложных технических систем / Н. К. Юрков, В. А. Ермолаев, Ю. А. Романенко // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2014. – Т. 1. – С. 46–49.
8. Дедков, В. К. Компьютерное моделирование характеристик надежности нестареющих восстанавливаемых объектов / В. К. Дедков, Н. А. Северцев // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2010. – Т. 1. – С. 368–370.
9. Абдурагимов, И. М. Еще раз о принципиальной невозможности выполнения расчетов пожарных рисков детерминированными методами / И. М. Абдурагимов // Пожаровзрывобезопасность. – 2013. – Т. 22, № 6. – С. 13–23.

10. *Абрамов, О. В.* Оценка техногенного риска неконтролируемых систем / О. В. Абрамов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2018. – Т. 1. – С. 3–5.
11. *Гурьянова, Л. С.* Повышение помехозащищенности пожарных извещателей / Л. С. Гурьянова, Д. В. Киселева, В. И. Кулапин // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2018. – Т. 2. – С. 66–69.

References

1. Shkol'nikov A. D. *Osnovy teorii igr* [Fundamentals of game theory]. Leningrad, 1970.
2. Gorelik V. A. *Teoriya igr i issledovanie operacij* [The theory of game and operations research]. Moscow, 1978.
3. Wentzel E. S. *Issledovanie operacij. Zadachi. Principy. Metodologiya* [Operations Research. Tasks. Principles. Methodology]. Moscow: Nauka, 1988.
4. Sherstobitov V. V. *Matematicheskoe programmirovaniye* [Mathematical programming]. Leningrad, 1970, part 2.
5. Sherstobitov V. V. *Matematicheskoe programmirovaniye* [Mathematical programming]. Leningrad, 1969, part 1.
6. Wentzel E. S. *Teoriya veroyatnostej* [Probability theory]. Moscow: Vysshaya shkola, 1998.
7. Yurkov N. K., Ermolaev V. A., Romanenko Yu. A. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2014, vol. 1, pp. 46–49.
8. Dedkov V. K., Severtsev N. A. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2010, vol. 1, pp. 368–370.
9. Abduragimov I. M. *Pozharovzryvobezопасnost'* [Fire and explosion safety]. 2013, vol. 22, no. 6, pp. 13–23.
10. Abramov O. V. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2018, vol. 1, pp. 3–5.
11. Guryanova L. S., Kiseleva D. V., Kulapin V. I. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2018, vol. 2, pp. 66–69.

Безродный Борис Федорович

доктор технических наук, профессор,
заместитель руководителя,
Центр кибербезопасности АО «НИИАС»;
заведующий кафедрой прикладной математики,
Московский автомобильно-дорожный
государственный технический университет
(125319, Россия, г. Москва,
Ленинградский проспект, 64)
E-mail: boris-bezrodny@yandex.ru

Безродный Игорь Федорович

кандидат технических наук, доцент,
научный консультант,
Научно-производственное предприятие «ГЕРДА»
(125480, Россия, г. Москва, ул. В. Лациса, 17, стр. 1)
E-mail: boris-bezrodny@yandex.ru

Виноградов Алексей Сергеевич

научный сотрудник,
Институт инженерной физики
(142210, Россия, Московская обл., г. Серпухов,
Большой Ударный пер., 1а)
E-mail: boris-bezrodny@yandex.ru

Bezrodniy Boris Fyodorovich

doctor of technical sciences, professor, deputy head,
Center for cybersecurity JSC «NIAS»;
head of sub-department of applied mathematics,
Moscow State Automobile and Highway Technical
University
(125319, 64 Leningradskiy avenue, Moscow, Russia)

Bezrodny Igor Fyodorovich

candidate of technical sciences, associate professor,
senior scientific advisor,
Scientific-production enterprise "GERDA"
(125480, 1, 17 V. Latsisa street, Moscow, Russia)

Vinogradov Alexey Sergeevich

researcher,
Institute of engineering physics
(142210, 1A Bol'shoy Udarnyy lane, Serpukhov,
Moscow region, Russia)

УДК 81.92

Безродный, Б. Ф.

Оптимизация порядка применения средств и мероприятий обеспечения абсолютной пожарной безопасности объекта / Б. Ф. Безродный, И. Ф. Безродный, А. С. Виноградов // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 3 (23). – С. 133–142. – DOI 10.21685/2307-4205-2018-3-16.

В. А. Путилов, А. В. Маслобоев, В. В. Быстров

КОМПЛЕКС ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ПОДДЕРЖКИ УПРАВЛЕНИЯ РЕГИОНАЛЬНОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ¹

V. A. Putilov, A. V. Masloboev, V. V. Bystrov

SIMULATION MODEL COMPLEX FOR REGIONAL SECURITY CONTROL SUPPORT

Аннотация. Для информационно-аналитического обеспечения систем поддержки принятия решений региональных ситуационных центров разработан полимодельный комплекс, состоящий из проблемно-ориентированных имитационных моделей прогнозирования социально-экономического развития региона и позволяющий оценить и исследовать динамику показателей региональной безопасности. Комплекс отличается композитной структурой, т.е. динамически формируется из конечного числа типовых модельных блоков (шаблонов), что повышает корректность входящих в него моделей и сокращает время настройки среды моделирования на особенности решаемых задач управления. Модельный инструментарий позволяет сформировать, исследовать и расширить спектр альтернативных сценариев моделирования региональных кризисных ситуаций, что повышает качество информационного обеспечения для выработки и реализации эффективных управленческих решений. Применение комплекса обеспечивает высокую вариабельность реализации вычислительных экспериментов.

Ключевые слова: имитационная модель, полимодельный комплекс, информационное обеспечение, управление, региональная безопасность, система поддержки принятия решений.

Abstract. For information and analytical maintenance of the regional situational center decision support system a polymodel complex, which consists of problem-oriented simulation models for regional socio-economic development forecasting and allows regional security indexes dynamics assessment and analysis, has been developed. The distinctive feature of model complex is its composite structure that is complex dynamic synthesis by finite number of the typical modeling modules (patterns). That provides incoming with it models validation enhancement and time reduction of modeling environment configuration by the specific features of solving control problems. Simulation toolkit allows alternative modeling scenario spectrum formation, analysis and extension of regional crisis situations. That provides efficient managerial decision-making by means of information support quality and validity enhancement. Complex application provides high variability of computing experiments implementation.

Key words: simulation model, multi-model complex, information support, control, regional security, decision support system.

Введение

В современных геополитических условиях актуальной и важной задачей является выстраивание эффективной архитектуры безопасности в Арктической зоне России и совершенствование системы организационного управления безопасным развитием северных территорий. Это необходимо для предупреждения и нейтрализации рисков и угроз дестабилизации обстановки в этом стратегическом регионе национального значения. Сегодня, когда вопросы региональной безопасности приобрели глобальный масштаб и зачастую переходят во все измерения (политическое, военное, социально-экономическое, информационное и др.), тема развития информационных технологий и связи в арктическом регионе приоритетна и своевременна как никогда. Эскалация интересов в Арктической зоне России и безответственная гонка за различными видами ресурсов (природными, кадровыми, финансовыми) могут стать причиной экологических катастроф и разрушения традиционных укладов жизни народов Севера. Уникальные особенности арктических регионов способны мгновенно придать любому негативному инциденту масштабы настоящего бедствия. Поэтому бережное отношение к

¹ Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований – грант 18-07-00167-а.

ресурсному потенциалу северных территорий является главным приоритетом развития Арктической зоны. Сталкиваясь с неординарными вызовами и критическими ситуациями в этом районе, необходимо принимать быстрые и эффективные решения, реагировать на них в ограниченное время, соблюдая при этом самые высочайшие стандарты социально-экономической безопасности.

Для решения поставленных задач в регионах Арктической зоны развернута сеть ситуационных центров. Некоторые из них уже успешно выполняют свои функции по предупреждению и мониторингу угроз региональной безопасности. Другие – только находятся в стадии создания и развития. Например, такой центр при губернаторе недавно создан в Мурманской области. Он предназначен для поддержки оперативного принятия управленческих решений и мониторинга социально-экономической ситуации в регионе.

Вместе с тем возникает ряд трудностей с организацией эффективной работы сети ситуационных центров региона. Во-первых, сеть большая, много решающих элементов, а всем нужно дать информацию, точно соответствующую ситуации. Во-вторых, когда речь идет о социально-экономической ситуации, нужно учитывать слишком много аспектов управления региональной безопасностью, а они очень разноплановые. Здесь и экономические риски, и социальная напряженность, и экологические проблемы и т.д. Создание сетецентрической информационной инфраструктуры безопасности региона позволит нивелировать эти особенности реализации процесса управления безопасностью региона на базе ситуационных центров. Информационно-аналитическое сопровождение ситуационных центров и интеллектуализация средств поддержки принятия решений, используемых в их работе, обеспечат управленцев современными инструментами сбора, обработки и анализа разноплановой информации о влиянии различных угроз на состояние региональных систем для принятия обоснованных решений и их согласования на всех уровнях управления безопасностью региона. Объединение ситуационных центров региона под эгидой сетецентрического управления – перспективный путь к решению проблемы повышения эффективности функционирования всей системы управления региональной безопасностью.

В статье представлен краткий обзор имитационных моделей, разработанных в ИИММ КНЦ РАН и предназначенных для решения задач информационной поддержки управления безопасностью региона в составе программно-технического обеспечения региональных ситуационных центров.

Региональная безопасность и ее составляющие

Объектами исследования в работе являются региональная безопасность и многоуровневая система управления безопасностью региона. Региональная безопасность определяется как состояние защищенности социально-экономической системы региона, при котором действие внешних и внутренних факторов не приводит к ухудшению или к невозможности ее функционирования и развития.

К внутренним факторам (угрозам) относятся, например, демографические проблемы (миграция), истощение ресурсной базы, проблемы кадрового обеспечения и т.д., а к внешним – экологические проблемы, изменение инвестиционного климата и др. Влияние этих факторов порождает различные кризисные явления и чрезвычайные ситуации в регионе.

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.

Многоуровневая система управления безопасностью региона структурно представляет собой распределенную систему, состоящую из следующей совокупности элементов: управляющие центры и субъекты управления безопасностью (на верхнем уровне) и взаимодействующие на территории региона хозяйствующие субъекты и социальные индивиды (на нижнем уровне).

Глобальная цель такой системы декомпозируется на такие подцели, как обеспечение безопасности региональной экономики, обеспечение стабильности в социальной сфере, обеспечение экологической устойчивости, обеспечение инвестиционной привлекательности региона и другие составляющие региональной безопасности, соответствующие целям устойчивого регионального развития. Декомпозиция определена на концептуальной модели предметной области «региональная безопасность» и определяет функциональную структуру системы управления в этой области.

Отличительной особенностью системы является использование в блоке поддержки принятия решений комплекса имитационных моделей, обеспечивающих активный прогноз динамики показателей безопасности региона для каждой области региональной безопасности (экономика, социаль-

ная сфера, окружающая среда, образование, демография и др.). Система оперирует специальным набором показателей, отражающих территориальную и отраслевую специфику региона. Эти показатели и структура взаимосвязей между ними формализованы в соответствующих имитационных моделях и являются их параметрами.

Методологическая база и специфика объекта исследования

Исследование проводилось на примере проблем безопасности специфичных для Мурманской области. Ключевыми особенностями этого региона, отличающими его от других территорий, являются приграничное местоположение, суровый климат, специфика хозяйственного освоения и перегруженность территории объектами оборонного и промышленного комплексов. Другими важными особенностями являются также высокая концентрация моногородов, низкая устойчивость экологических систем и демографические проблемы. Эти факторы в совокупности обуславливают уязвимость арктического региона в плане возникновения разнотипных кризисных ситуаций природного, техногенного и социально-экономического характера. Для нейтрализации последствий таких ситуаций необходимо принимать быстрые и эффективные управленческие решения в очень ограниченное время. Задача усложняется тем, что на практике решения на разных уровнях обеспечения безопасности принимаются изолированно, а субъекты управления, как правило, децентрализованы. Поэтому требуется обеспечить согласованное взаимодействие субъектов региональной безопасности и комплексную информационно-аналитическую поддержку их совместной деятельности. Это представляется возможным за счет перехода на модель сетцентрического управления безопасностью региона и формирования единой виртуальной среды группового принятия решений для обеспечения «ситуационной осведомленности» [1]. Такого в управлении безопасностью социально-экономических систем ранее реализовано не было. Делались попытки управлять региональной безопасностью централизованно, но это не обеспечило нужного эффекта, поскольку аспектов управления региональной безопасностью много и они очень разноплановые. Предлагаемый 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.

При моделировании социально-экономических систем выбор типов моделей и средств их практической реализации зависит от особенностей решаемых задач. Одним из наиболее эффективных подходов к моделированию региональных систем является метод системной динамики [2]. Данный метод применяется для исследования динамически сложных процессов с множественными и, как правило, неоднородными обратными связями, что затрудняет применение аналитических методов для их моделирования. Постоянный рост вычислительной мощности компьютеров, а также развитие программных средств реализации диалога между пользователем и инструментальной средой моделирования способствуют тому, что имитационное моделирование все шире используется в области исследования и управления социально-экономическими системами и процессами. Важным достоинством инструментальных средств системно-динамического моделирования является возможность оперативной настройки не только параметров модели, но и ее структуры непосредственно в ходе реализации вычислительных экспериментов. Отмеченные аспекты и имеющийся мировой опыт [3–6] позволяют констатировать большой потенциал метода системной динамики в приложении к задачам информационной поддержки управления безопасностью региональных систем, характеризующихся структурной сложностью, неопределенностью ситуаций, большой длительностью развития и слабой формализованностью. Таким образом, в качестве основного инструментария имитационного моделирования процессов управления региональной безопасностью используется метод системной динамики.

Общая характеристика полимодельного комплекса

Для прогнозирования динамики показателей безопасности региона при заданных параметрах и ограничениях разработана комплексная системно-динамическая модель безопасности региона, реализованная в виде полимодельного комплекса взаимосвязанных имитационных моделей. Модель создана на основе концептуальной модели региональной безопасности [7] и библиотеки типовых имитационных шаблонов с применением метода синтеза имитационных моделей сложных систем [8], предложенного в ИИММ КНЦ РАН и обеспечивающего автоматизацию синтеза моделей системной динамики из соответствующих концептуальных моделей.

Полимоделный комплекс представляет собой набор функциональных модельных блоков, позволяющих оценить состояние и тенденции развития региональных элементов и подсистем: демография, производство, рынок труда, наука и образование, окружающая среда и других. Комплекс отличается композитной структурой, т.е. структура моделей динамически формируется из конечного числа типовых модельных шаблонов, что повышает корректность глобальной модели и сокращает время на ее конфигурацию «под задачу».

В комплексе моделей используется оригинальная система показателей безопасности, созданная в результате формирования интегральных показателей, полученных путем свертки ряда групп общепринятых индексов безопасности. Модели включают также индивидуальные показатели региона, отражающие изложенную выше специфику Мурманской области, а также учитывают взаимосвязи между различными показателями социально-экономического развития региона.

Структура комплексной модели получена в результате декомпозиции следующих базовых показателей: валовой региональный продукт, население, бюджет и др. Прimitивами (объектами нижнего уровня декомпозиции) модели являются: выручка от продажи товаров, себестоимость проданных товаров, численность населения по возрастным группам, среднедушевые денежные доходы населения по каждой группе, среднегодовая численность занятых в экономике, инвестиции в основной капитал, среднегодовая заработная плата, уровень безработицы, миграционный прирост, естественный прирост, уровень социальной обеспеченности, количество предприятий (рабочих мест), социальное потребление, федеральная финансовая помощь.

Библиотека системно-динамических шаблонов для комплекса имитационных моделей реализована в интегрированной среде системно-динамического моделирования Powersim Studio [9] и с помощью двух специализированных приложений – редактора шаблонов и системы прикладного имитационного моделирования [10]. Шаблоны созданы для таких концептуальных классов, как: объекты обеспечения безопасности, субъекты управления безопасностью, действующие внутренние и внешние факторы, кризисные ситуации, сценарии снижения рисков воздействия потенциальных угроз и опасностей и других. Синтез проблемно-ориентированных имитационных моделей из шаблонов осуществляется на основе концептуального описания решаемых задач управления.

Полимоделный комплекс в отличие от общеизвестных динамических моделей [2, 11], являющихся базовыми для моделирования устойчивого развития макросистем различного уровня, позволяет учитывать наиболее существенные и разноплановые аспекты региональной безопасности, важные с точки зрения региональной специфики и целей моделирования устойчивого развития, и объединить их в единое целое. Комплекс состоит из следующих основных модельных блоков (рис. 1): население региона, производство, финансы, рынок труда, наука и образование, окружающая среда, технологические инновации, ресурсная база, описывающих состояние промышленного и инновационного потенциала региональной экономики, кадровой безопасности и экологической системы. Для каждого компонента на моделях формализованы основные риски.



Рис. 1. Комплекс имитационных моделей поддержки управления безопасностью региона

Комплекс обеспечивает оценку и анализ динамики потенциальных угроз безопасности при различных сценариях развития региона с предоставлением эксперту возможностей для вариативного расчета и оперативного корректирования показателей региональной безопасности в рамках существующей статистической отчетности. Модели учитывают систему ограничений для показателей ввиду их взаимной зависимости. В пределах этих ограничений может быть реализован один из нескольких вариантов развития.

Согласно гипотезе, выдвинутой в работе [12], в имитационной модели региона выбираются переменные, которые на определенных интервалах времени меняются медленно («медленные переменные»). Это обеспечивает возможность прогнозировать тенденции многих показателей и исследовать их факторные взаимосвязи.

Комплекс имитационных моделей промышленного потенциала региона создан в среде моделирования Anylogic [13] и включает в себя модели основных отраслей экономики Мурманской области: горнопромышленного, рыбопромышленного, сельскохозяйственного, туристического, транспортного и топливно-энергетического комплексов. Модели позволяют путем многократной имитации оценивать экономический и связанный с ним экологический риски различных сценариев развития региона.

Помимо показателей экономической и экологической безопасности полимодельный комплекс обеспечивает возможность прогнозирования показателей социальной и кадровой безопасности: численности занятых, безработных, демографическую ситуацию и др.

На основе модельных уравнений и доступной статистической отчетности в приложении к задачам информационной поддержки управления безопасностью региона был составлен прогноз показателей социально-экономической безопасности Мурманской области до 2020 г.

Для прогноза показателей региональной безопасности использовались открытые статистические данные, предоставленные Комитетом по статистике Мурманской области, экспертные оценки, открытые архивные материалы и оперативные отчеты ситуационных центров региона, предоставленные Правительством Мурманской области и Управлением по делам гражданской обороны, защите населения от чрезвычайных ситуаций и пожарной безопасности по Мурманской области. Исследование различных сценариев развития региона проводилось на модели с 2008 по 2020 г.

С помощью созданного комплекса моделей исследованы три сценария социально-экономического развития Мурманской области, учитывающие наиболее вероятное сочетание внешних и внутренних факторов, влияющих на безопасность региона:

- 1) «нормальный» – для фиксированного текущего экономического потенциала региона, который выражается в фиксировании на модели текущего количества рабочих мест;
- 2) «оптимистический» – соответствует росту экономического потенциала региона в среднем на 2–3 % в год;
- 3) «пессимистический» – соответствует снижению экономического потенциала региона в среднем на 2–3 % в год.

Расчет средней относительной ошибки для различных подмоделей комплекса показал, что ошибка составляет порядка 7–14 % с учетом имеющихся реальных данных по показателям социально-экономического развития региона за период 2008–2015 гг. и предоставленной статистики по кризисным ситуациям в указанном временном диапазоне. Семилетний период (2008–2015 гг.) использовался для тестирования моделей и оценки их точности. При этом стоит отметить, что оценка достоверности относится к числу «вечных» проблем имитационного моделирования. Это обусловлено прежде всего спецификой применения имитационного моделирования как инструментария исследования, который в отличие от классических методов математического моделирования не обеспечивает проектировщиков и исследователей сложных систем соответствующими формализованными средствами описания таких систем. Однако простота реализации некоторых процедур исследования в имитационном моделировании, например анализа чувствительности, делает метод имитационного моделирования привлекательным и доступным.

Структура и состав полимодельного комплекса

Структура полимодельного комплекса поддержки управления безопасностью региона показана на рис. 2. Рассмотрим подробно основные модельные блоки, образующие комплекс.

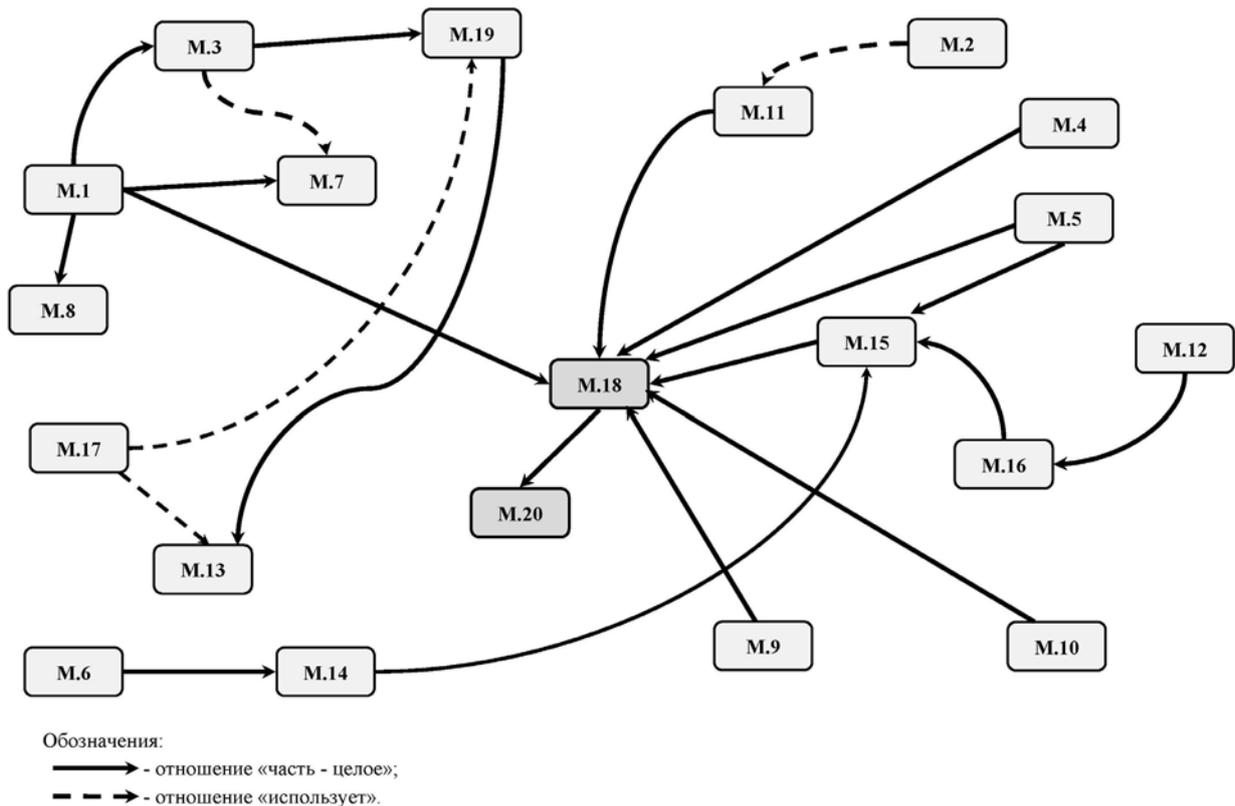


Рис. 2. Структура полимодельного комплекса поддержки управления безопасностью региона

М.1 – Системно-динамическая модель развития малого города Севера России (на примере г. Апатиты) позволяет разрабатывать и исследовать различные сценарии социально-экономического развития города. Модель состоит из следующих подсистем:

1. *Демографическая подсистема.* В рамках данной подмодели «население» разделено по полу и возрасту на три возрастные категории: 0–14, 15–50 и старше 50. Такое деление выполнено для того, чтобы моделировать такие важные для городского развития характеристики и отношения, как миграцию, различающуюся по возрастным группам и группам доходов, процентное соотношение безработных к работающим жителям и другие показатели, характеризующие социальную политику города.

2. *Подсистема жилья.* Весь жилой фонд в модели является муниципальным и делится на три категории: высшую, среднюю и низшую категорию, которая определяется степенью изношенности жилья. При этом в модели учитываются такие процессы, как ввод жилья в эксплуатацию и вывод из эксплуатации. Ввод жилья в эксплуатацию осуществляется за счет строительства абсолютно нового жилья и получения жилья от других ведомств (областных и федеральных министерств). Вывод жилья из эксплуатации реализуется за счет сноса жилых зданий по причине неудовлетворения их технико-санитарным нормам (ветхость и аварийное состояние), а также в связи с переоборудованием жилых помещений в нежилые.

3. *Подсистема управления городом* реализована в виде модели перераспределения денежных средств, которыми оперирует муниципалитет. Источниками поступления финансовых средств являются налоговые сборы, неналоговые поступления, дотации из областного и федерального бюджетов. Налоговые поступления имеют явно выраженную связь с показателями экономического и жилищного секторов моногорода. Расходная часть городского бюджета формируется из отчислений на содержание и ремонт жилья, здравоохранение, социальную сферу, образование и отчислений в госбюджет.

4. *Экономический блок.* Эта подсистема является одной из важнейших составляющих системно-динамической модели города, поскольку моделирование экономических процессов обеспечивает основу для выработки рекомендаций по реализации различных вариантов развития города. Важными параметрами экономического блока являются такие факторы, как наличие рабочих мест в городе,

прибыльность предприятий, возможность финансирования городской инфраструктуры, средняя заработная плата и другие.

Особенностью применения этой системно-динамической модели является смещение акцента в сторону исследования процессов занятости населения малого города Севера, в частности, перераспределение трудовых ресурсов между производствами и изменение уровня безработицы. Модель предназначена для специалистов городской администрации, занимающихся вопросами разработки стратегии развития города и планированием муниципального бюджета.

М.2 – Системно-динамическая модель топливно-энергетического комплекса Мурманской области состоит из следующих функциональных модельных блоков: производство электроэнергии, производство теплоэнергии, потребление тепло- и электроэнергии, ее передача и распределение. На базе модели за счет включения дополнительных модельных элементов реализована возможность исследования таких сценариев развития региональной энергетической системы, как:

- 1) проведение реконструкции 1-го энергоблока Кольской атомной электростанции (КАЭС);
- 2) строительство нефтеперевалочного комплекса;
- 3) снижение ставки федерального налога;
- 4) строительство алюминиевого завода в г. Кандалакша.

Модель прошла экспертную оценку специалистов Кольской АЭС и Центра физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН. Особенностью разработанной модели является предоставление возможности лицу, принимающему решения, на основе результатов вычислительного эксперимента проводить сценарный анализ и оценивать риски развития энергетической системы региона в количественных показателях.

Модель используется Министерством энергетики и ЖКХ Мурманской области, а также предназначена для поставщиков тепло- и электроэнергии, в область компетенции которых входит разработка стратегий и планов развития энергосистем региона и их финансовое сопровождение.

М.3 – Системно-динамическая модель экономического потенциала моногорода получена в результате интеграции динамической модели населения и формирования бюджета монопрофильного муниципального образования. Модель состоит из двух основных компонентов: бюджет города и финансовая система предприятий города. Предприятия города разделены по видам бизнеса на крупные, средние и малые. В рамках модели реализуются процессы возникновения и ликвидации предприятий, изменение категории предприятия (от малого бизнеса к среднему и обратно), изменение численности сотрудников на соответствующих предприятиях. Городской бюджет разделен на доходную и расходную часть. В доходной части бюджета учитываются разные дотации, налоговые поступления, неналоговые поступления, в расходной части – отчисления в госбюджет, на жилищно-коммунальное хозяйство, культуру, образование, социальную политику, здравоохранение и др.

Модель позволяет оценить экономический потенциал моногорода, выражающийся в степени диверсификации экономики монопрофильного города. Модель является средством проигрывания различных вариантов управляющих воздействий со стороны муниципальных властей на экономическую ситуацию в городе и оценки их возможного влияния на качество жизни населения.

М.4 – Системно-динамическая модель рыбопромышленного комплекса Мурманской области позволяет исследовать взаимное влияние уровня технологий, качества производимой продукции и капиталовложений в рыбопромышленной отрасли региональной экономики. Модель состоит из следующих подсистем: подсистема вылова рыбы, подсистема флот, демографическая подсистема, подсистема выпуска рыбной продукции, подсистема объемов производства и доходов, подсистемы общего объема производства и общего количества рыбы, а также подсистема предприятий, занимающихся выращиванием рыбы.

В подмодели вылова рыбы по основным данным, таким как квота, природные предпосылки и технические условия, определяется максимально возможный объем выловленной рыбы. В подмодели флот определяются технические параметры эксплуатации корабельного состава, т.е. степень износа флота, количество судов, подлежащих ремонту или снятию с эксплуатации, а также число модернизированных судов. В демографической подмодели на основе демографических показателей, таких как естественный прирост, коэффициенты рождаемости и смертности, коэффициенты иммиграции и эмиграции населения, определяется численность населения Мурманской области. В подмодели выпуска рыбной продукции определяется количество основных видов продукции, таких как охлажденная рыба, товарной пищевой рыбной продукции и консервы. В подмодели объемов

производства рассчитываются прибыль, расходы и чистый доход от реализации рыбной продукции. В подмодели доходов вычисляются финансовый доход от экспорта рыбы и рыбной продукции в зарубежные страны, а также доход от продаж на внутреннем рынке страны. В подмодели общий объем производства определяется общее количество рыбы, которая формируется за счет объемов выловленной рыбы добывающими предприятиями и объемов выращенной рыбы рыбоводческими хозяйствами. В подмодели рыбоводческих предприятий рассматриваются процессы, связанные с выращиванием основных видов промысловой рыбы и морепродуктов: лососем, форелью, морского ежа и мидий.

Отличительной особенностью модели является учет таких параметров, как квоты на вылов, изменения пропорций между поставками на внутренний и внешний рынок, объем инвестиций на технологическое переоснащение и увеличение производительности рыбохозяйственных предприятий и других.

М.5 – Системно-динамическая модель аграрного комплекса Мурманской области воспроизводит процессы наиболее значимых (развитых) видов сельского хозяйства для Мурманской области и позволяет исследовать различные сценарии развития основных компонентов аграрной индустрии Заполярья, что отражено в отдельных взаимосвязанных блоках модели. Модель состоит из следующих блоков: разведение крупного рогатого скота; производство молочной продукции; птицеводство; свиноводство; оленеводство. В каждом блоке учтены объем производства соответствующей продукции (молочная продукция, яйца, говядина, свинина, оленина, мясо птицы и т.д.), расходы и доходы от производства.

Модель использована при разработке Стратегии социально-экономического развития Мурманской области до 2015 г. Модель ориентирована на применение в государственных учреждениях, занимающихся вопросами построения активных прогнозов развития сельского хозяйства в регионе.

М.6 – Системно-динамическая модель деятельности горнодобывающего предприятия и прогнозирования забастовок предназначена для сценарного анализа рисков возникновения кризисных ситуаций (социальной напряженности и дефицита кадров) на горнодобывающих предприятиях региона. В частности, на основе применения модели формируются рекомендации по преодолению «предзабастовочных» ситуаций и забастовок, а также оценивается экономический выигрыш (или проигрыш) в условиях этих ситуаций, как для администрации предприятия, так и для профсоюзной организации.

Модель состоит из трех основных блоков: добыча полезных ископаемых и их переработка, финансовые потоки предприятия, социальная обстановка на предприятии. Каждый модельный блок имеет несколько связей по параметрам с другими фрагментами модели. Отличительной особенностью модели является включение в ее состав фрагмента, отвечающего за моделирование социальных процессов на предприятии, связанных с проводимой кадровой политикой руководства и деятельностью профсоюзной организации. Вероятность забастовок зависит от динамики социальной напряженности, которая характеризуется размером выплат рабочим. Модель прошла апробацию на данных о деятельности Кировского рудника горнодобывающего предприятия ОАО «Апатит».

М.7 – Системно-динамическая модель развития частного предпринимательства в моногороде (на примере г. Кировска) предназначена для исследования вариантов развития малого и среднего бизнеса непрофильных видов экономической деятельности. В модели основной акцент сделан на индивидуальное предпринимательство в сфере обслуживания: торговля и прочие услуги. В рамках модели имитируются процессы создания и ликвидации предприятий малого бизнеса, формирования налоговых отчислений в городской бюджет в зависимости от выбранной схемы налогообложения.

Модель обеспечивает сценарный анализ различных ситуаций, регулируемых налоговой ставкой, схемой налогообложения и прочими мерами государственного и муниципального стимулирования предпринимательской деятельности, с целью определения наиболее благоприятных условий для развития частного малого бизнеса. Модель позволяет оценить возможные налоговые отчисления в городской бюджет в зависимости от проводимой экономической политики администрации моногорода.

М.8 – Системно-динамическая модель жилищного комплекса моногорода предназначена для получения прогнозов о состоянии жилого фонда и влиянии на него различных экономических и демографических факторов. Модель состоит из двух подмоделей: демографическая система города

и жилой фонд. Демографическая система имеет половозрастную структуру, учитывает рождаемость, смертность и миграцию по каждой категории населения. Миграционные процессы зависят от наличия и качества жилья в городе. Жилой фонд включает в себя три категории зданий – низкую, среднюю и высшую в зависимости от срока эксплуатации и проведения капитальных ремонтов. В качестве экономических показателей в модели выступают стоимость ремонта, средства, выделяемые на ремонт, строительство нового жилья и снос ветхого.

Модель позволяет спрогнозировать состояние жилого фонда в городе при заданных сценарных условиях по каждой категории жилья. Особенностью модели является реализация возможности перехода здания из одной категории жилья в другую в зависимости от объемов проведенных ремонтных работ.

М.9 – Системно-динамическая модель загрязнения окружающей среды административно-территориального образования учитывает различные показатели антропогенной деятельности, прямо или косвенно влияющих на экологическую обстановку для северных территорий. Модель позволяет оценить возможные изменения состояния окружающей среды и последующее влияние таких изменений на здоровье человека. Модель состоит из отдельных блоков, каждый из которых отражает отдельный аспект экологического состояния региона: загрязнение окружающей среды, изменение природных ресурсов (минеральных, водных, растительных, почвенных, земельных, животного мира). В рамках модели имитируются процессы загрязнения воздуха, вод (в том числе источники питьевой воды) и почвы.

Особенностью модели является введение для исследования загрязнения окружающей среды двух понятий: реальное загрязнение окружающей среды и воспринимаемое человеком загрязнение. Второе понятие введено вследствие того, что практически любое изменение загрязнения окружающей среды, в которой находится человек, не будет отражаться на состоянии его здоровья немедленно, то есть данный процесс обладает свойством инерции. Величина загрязнения от любого источника и величина загрязнения, воспринимаемая человеком, определяются в соответствующих единицах измерения, характерных для определенного вида загрязнения.

Модель используется Министерством природных ресурсов и экологии Мурманской области и прошла апробацию на статистических данных о загрязнении окружающей среды, полученных для административно-территориальных образований региона – поселков Ревда и Ловозеро, городов Оленегорск и Мончегорск.

М.10 – Системно-динамическая модель продовольственной безопасности Мурманской области предназначена для исследования особенностей процессов формирования спроса и предложения на различные виды продовольственной продукции в регионе и оценки степени обеспеченности ею разных категорий населения региона. Модель продовольственной безопасности Мурманской области состоит из следующих подмоделей:

- 1) подмодель областного бюджета;
- 2) подмодели производства основных продуктов питания и их потребления населением региона;
- 3) подмодель населения региона (общая численность, прирост и убыль населения).

В модели региональный бюджет формируется из доходной и расходной части, каждая из которых определяется набором соответствующих параметров продовольственной безопасности. Доступность для населения разнообразных продуктов питания зависит как от функционирования регионального аграрного комплекса, так и импорта из других регионов и стран. Модель имитирует процессы производства, поставки и потребления по следующим видам продуктов: мясная продукция, молочная продукция, яйца, овощная продукция, рыбная продукция. Для формирования спроса на разные виды продуктов в модель включена демографическая подсистема, воспроизводящая поведение разных категорий потребителей продуктов питания.

Потенциальными пользователями модели являются специалисты государственных и частных организаций, занимающиеся вопросами планирования поставок продовольственной продукции, а также оценкой спроса и предложения на разные виды продуктов питания.

М.11 – Имитационная модель энергетической безопасности Мурманской области представляет собой интегрированные аналитические описания динамики производства и потребления электрической и тепловой энергии в регионе. Модель имеет модульную структуру и использует описанную выше модель **М.2**, что позволяет исследовать различные стратегии развития топливно-

энергетического комплекса с учетом его взаимодействия с другими отраслями экономики Мурманской области.

Особенностью модели является способ ее генерации, который заключается в соединении в автоматизированном режиме типовых системно-динамических конструкции (шаблонов) и определения значений их параметров. Концептуальной основой модели является декомпозиция глобальной цели функционирования топливно-энергетического комплекса Мурманской области и представление ее в виде дерева целей, а также формальные процедуры сопоставления вершинам дерева соответствующих концептуальных шаблонов.

М.12 – Имитационная модель управления качеством образования является одной из основных составляющих системы информационной поддержки управления развитием регионального научно-образовательного комплекса. Управление качеством реализуется на основе имитационного моделирования за счет проигрывания различных сценариев организации учебного процесса в научно-образовательном комплексе с учетом потребностей отраслей региональной экономики в подготовке квалифицированных кадров.

Имитационная модель имеет мультиагентную реализацию. Основными элементами модели являются два типа агентов – преподаватель и студент, и три типа сцены – аудиторное занятие, внеаудиторное занятие и научно-исследовательская деятельность. Каждый тип агента и сцены параметризован и определен набор основных свойств и характеристик. Для каждой характеристики определен тип (измеряемые, экспертные и формальные) и диапазон допустимых значений. Для оценки качества образования используются значения уровней знаний, полученные студентами по каждой дисциплине учебного плана. Для каждого студента имитируется уровень усвоения каждой дисциплины. Основными действиями агентов на сцене «аудиторные занятия» являются: передача знаний преподавателем; посещение занятий студентом; усвоение знаний студентом. На передачу знаний влияют такие параметры преподавателя, как квалификация, компетентность, опыт работы, а также параметры сцены: лабораторная база, библиотека, качество аудиторий. В свою очередь, на посещение занятий студентом влияют личные и профессиональные качества преподавателя, параметры сцены, мотивация и состояние здоровья студента.

Модель предназначена для решения трех задач:

- 1) управление качеством образования – основная идея заключается в получении уровня успеваемости в различных срезах в зависимости от заданных параметров агентов и сцены;
- 2) распределение приоритетов, в рамках которой студент настраивает под себя одного агента и смотрит полученные результаты моделирования, тем самым модель выступает в качестве средства распределения внимания студента между изучаемыми дисциплинами;
- 3) обратная задача – заключается в нахождении необходимых значения параметров агента с учетом минимизации прикладываемых усилий для достижения заданных целевых значений уровня усвоения.

Созданная имитационная модель ориентирована на использование в учреждениях высшего образования, где развивается управление качеством образования через внедрение систем менеджмента качества.

М.13 – Имитационная модель научно-инновационного предприятия при региональном научном центре представляет собой композицию параметризованных шаблонов, обеспечивающую имитацию основных процессов развития предприятия: производство продукции и потребление ресурсов, финансовые потоки и управление. Развитие предприятия представляет собой последовательность фаз, в пределах которых происходит рост (количественное изменение параметров), а при переходе в следующую фазу происходят структурные изменения. Структурными изменениями являются: введение многоуровневой структуры управления предприятием, формирование новых структур (стратегическое планирование, логистика и т.д.), децентрализация управления, организация территориально распределенного производства.

Внутренние условия, которыми являются такие параметры, как производство, финансы, кадры и управление, определяют на модели траекторию развития предприятия внутри каждой фазы. Внешние условия, такие как рынок и географическое положение предприятия, определяют в модели количественные характеристики каждой фазы роста предприятия до наступления кризиса. Пересечение фаз свидетельствует о том, что при принятии своевременных адекватных управленческих решений предприятие может развиваться самостоятельно. Отсутствие пересечения соседних фаз говорит о том, что предприятие самостоятельно не сможет перейти из одной фазы развития в другую без инвестиционной поддержки.

Многokратная имитация процесса развития в каждой фазе позволяет определить на траектории развития предприятия внутри фазы области роста и деградации и, соответственно, выделить область принятия решения, которая находится между периодами роста и деградации предприятия. Модель позволяет в ходе пошаговой имитации для любой точки внутри области принятия решения получить прогноз последствий принятия или не принятия решения в данный момент времени. Таким образом, модель не только обеспечивает прогнозирование развития, но и способствует лучшему пониманию механизмов развития научно-инновационного предприятия.

М.14 – Имитационная модель кадрового обеспечения горнодобывающего предприятия включает в себя следующие основные блоки: движение кадров на предприятии; формирование новых рабочих специальностей; городской рынок труда; миграция и эмиграция. Блок движения кадров на предприятии отвечает за процессы, связанные с определением количества принятых, уволенных и переподготовленных рабочих. Блок формирования новых рабочих специальностей предназначен для определения числа рабочих мест, требующих от работника обладания новым набором профессиональных компетенций, умений и знаний. Блок городского рынка труда отражает процессы изменения количества безработных, являющихся потенциальными работниками горнодобывающего предприятия. Блок миграции и эмиграции воспроизводит процессы трудовой миграции, свойственные для определенного административно-территориального образования.

Модель отражает основные аспекты кадрового обеспечения горнодобывающего предприятия, такие как: требуемое количество рабочих на предприятии, количество уволенных и принятых рабочих, количество переподготовленных кадров на предприятии, количество новых появляющихся специальностей, количество специалистов, принятых на новые специальности из профильных учебных учреждений среднего профессионального и высшего образования. Отличительной особенностью модели является формирование очередности увольнения (сокращения) работников в разрезе групп специальностей и с учетом возрастной структуры кадров предприятия. Модель прошла верификацию и апробацию на данных горнодобывающего предприятия ОАО «ОЛКОН» (г. Оленегорск).

Модель ориентирована на использование в службах по управлению персоналом и системах кадрового менеджмента крупных предприятий горнодобывающей отрасли региона.

М.15 – Комплексная имитационная модель оценки кадровых потребностей базовых отраслей экономики Мурманской области предназначена для решения задач поддержки управления кадровой безопасностью региона. В качестве моделируемых отраслей региональной экономики были выбраны: горнодобывающая, торговая, рыбопромышленная и строительная отрасли экономики.

Структурно имитационная модель для каждой отрасли экономики определяется единообразно. Условно имитационную модель можно разделить на несколько блоков, которые отражают направленность каждого элемента:

1) *население области*. К основным задачам блока относятся: моделирование динамики изменения общей численности населения, учет рождаемости, смертности, иммиграции и эмиграции населения, а также количества рабочих мест по Мурманской области во всех отраслях и другие параметры;

2) *население, занятое в конкретной отрасли экономики*. В данном блоке оценивается численность населения, которое работает в рассматриваемой отрасли, количество безработных, принятых на работу, уволенных по различным причинам, а также количество рабочих мест в данной отрасли и др.;

3) *рабочие места конкретной отрасли*. Данный блок отражает количество возникших, ликвидированных, а также вакантных рабочих мест рассматриваемой отрасли, количество принятых, ушедших с работы людей по различным причинам, а также среднее число рабочих на предприятии конкретной отрасли и другие параметры;

4) *деятельность предприятий конкретной отрасли*. Данный блок включает в себя следующие параметры: объемы произведенных товаров и услуг, реализуемые инвестиционные проекты, технологическое переоборудование, другие меры, направленные на повышение производительности, и т.д.;

5) *динамика предприятий конкретной отрасли*. Данный блок имитирует процессы создания и ликвидации предприятий в рассматриваемой отрасли в зависимости от экономических показателей региона и отрасли;

6) *региональный рынок труда*. Данный блок является общим для всех подмоделей и отвечает за имитацию процесса формирования предложений для работодателей из числа нетрудоустроенного населения.

Особенностью модели является то, что для расчета отдельных модельных параметров были построены регрессионные функции на основе данных официальной статистики и экспертных оценок. Модель позволяет оценить в среднесрочной перспективе потребности в кадрах каждой из основных отраслей экономики Мурманской области, что необходимо для составления рационально обоснованных планов по развитию экономики региона.

М.16 – Имитационная модель для оценки количества выпускников вузов и ссузов Мурманской области структурно воспроизводит региональную систему среднего профессионального и высшего образования Мурманской области. Было выделено 19 укрупненных групп специальностей для высшего образования и 16 – для среднего профессионального. Для каждой укрупненной группы специальностей была построена соответствующая системно-динамическая модель, отражающая процессы поступления, обучения и отчисления обучающихся с данного направления подготовки. Для программ подготовки высшего образования в модели также учитывался уровень подготовки: бакалавриат, специалитет и магистратура.

Модель позволяет получать прогнозы о количестве выпускников, подготовленных региональной системой образования, и отслеживать предполагаемые изменения в структуре подготовки кадров в регионе в зависимости от планируемых или реализуемых программ развития региональных и федеральных властей. Модель используется в составе системы поддержки принятия решений по управлению кадровой безопасностью региона.

М.17 – Комплекс системно-динамических моделей процессов рыночной диффузии инноваций создан на базе оригинальной технологии дистанционного формирования имитационных моделей из типовых модельных шаблонов (паттернов) [10]. Комплекс предназначен для исследования инновационных процессов и обеспечивает прогнозирование показателей инновационной безопасности региона, а также рыночной результативности инновации при различных маркетинговых стратегиях. На моделях формализованы базовые показатели инновационной безопасности региона, позволяющие оценить результативность инноваций и их влияние на экономику региона. К исследуемым с помощью моделей показателям инновационной безопасности региона относятся: объем регионального рынка инноваций, количество успешно реализуемых инновационных проектов (уровень инновационной активности), количество подготовленных специалистов новых направлений, объем производимых в регионе инновационных товаров и услуг, удельный вес организаций региона, осуществляющих научно-инновационную деятельность, затраты на инновации и другие макроэкономические показатели.

Главным назначением комплекса моделей как средства информационной поддержки принятия решений в данном случае является повышение эффективности инновационного менеджмента, улучшение качества управленческих решений за счет лучшего понимания их влияния на динамику показателей инновационной безопасности развития региона в динамически изменяющихся социально-экономических условиях. В состав комплекса входят следующие компоненты (подмодели):

- 1) ядро, реализованное в виде разновидности эпидемической модели распространения инновационного продукта;
- 2) модель временных параметров жизненного цикла инновации;
- 3) модель ценообразования;
- 4) модель управления рыночным продвижением продукта (рекламой);
- 5) модель управления качеством продукта;
- 6) модель конкурентного рынка;
- 7) модель научно-образовательного комплекса;
- 8) модель социально-экономической системы региона.

Созданные системно-динамические модели могут использоваться как в комплексе, так и по отдельности, для исследования динамики показателей инновационной безопасности при различных сценариях развития региона, а также в составе систем поддержки принятия решений, применяемых в этой сфере.

М.18 – Комплексная системно-динамическая модель региональной безопасности Мурманской области создана на основе синтеза имитационных моделей из концептуальных шаблонов и когнитивных карт с привлечением эмпирических и статистических данных.

Модель позволяет проводить вычислительные эксперименты с целью получения прогнозов о состоянии социально-экономической системы региона для последующей оценки уровня региональной безопасности. Для оценки региональной безопасности используется матрица региональной без-

опасности, которая формируется на основе системы индикаторов и включает в себя показатели для каждой составляющей безопасности региона: население и демографические процессы, общество и социо-культурные аспекты, основные отрасли экономики, система образования и подготовки кадров, экология и загрязнение окружающей среды, финансовая региональная система и других.

Характерной особенностью модели является совместное использование агентного моделирования, позволяющего оперировать частными показателями, и метода системной динамики, работающего в основном с агрегированными и макроэкономическими показателями, для получения интегрированных индикаторов, отражающих состояние как региональной безопасности в целом, так и отдельных ее составляющих.

М.19 – Комплексная имитационная модель инновационного пространства моногородов Арктической зоны России представляет собой набор взаимосвязанных формальных конструкций, построенных с использованием метода системной динамики и агентного подхода. В состав модели входят следующие укрупненные модельные блоки: социально-экономическая система моногорода, деятельность градообразующего предприятия, развитие непрофильных производств, фазы реализации инвестиционного проекта, процесс диверсификации экономики моногорода и другие.

Модель позволяет формировать аналитическую информацию о возможных вариантах развития экономической ситуации в моногородах арктического региона и прогнозировать на ее основе изменения инвестиционной привлекательности населенного пункта и эффекты от реализации планируемых инновационных проектов. Такая информация получается на основе результатов вычислительного эксперимента, имитирующего поведение сети моногородов Арктической зоны в различных сценарных условиях.

Особенностью модели является представление процесса формирования единого инновационного пространства моногородов Арктической зоны в виде взаимосвязанных процессов развития инновационного потенциала каждого из городов, входящего в сеть территориально распределенных монопрофильных административных образований в этом районе. Инновационный потенциал меняется в зависимости от реализации разнообразных инвестиционных проектов, направленных либо на технологическую модернизацию производства или изменение производственной мощности градообразующего предприятия, либо на диверсификацию экономики моногорода.

Модель может найти применение для решения практических задач по планированию и реализации социально значимых мероприятий, ориентированных на развитие экономической среды моногородов, а также при разработке стратегии социально-экономического развития регионов Арктической зоны России. Ключевые пользователи модели – региональные и муниципальные органы государственной власти, специалисты по разработке комплексных инвестиционных планов административных территориальных образований.

М.20 – Комплексная имитационная модель управления жизненным циклом проектов в сфере региональной безопасности получена в результате апробации технологии информационной поддержки жизненного цикла управления мероприятиями по противодействию угрозам региональной безопасности. Генерация имитационной модели осуществлялась посредством применения процедур формирования модели из совокупности типовых модельных шаблонов, обладающих фиксированной структурой и набором параметров и описывающих процессы, характерные для задач управления мероприятиями в сфере региональной безопасности.

Структурно имитационная модель состоит из следующих модельных шаблонов: фаза проекта, жизненный цикл проекта, отдельный проект, портфель проектов, система управления проектом, а также использует комплексную имитационную модель региональной безопасности Мурманской области. Каждый шаблон представляет собой агента, поведение которого определяется соответствующей системно-динамической моделью. Отдельные агенты могут входить в состав агентов более высокого уровня (например, фаза проекта – жизненный цикл проекта).

Модель обеспечивает оценку влияния мероприятий, направленных на противодействие угрозам региональной безопасности, на социально-экономическую обстановку в регионе. Модель позволяет многократно использовать результаты вычислительного эксперимента для формирования аналитической информации с целью выработки комплексных решений по управлению параметрами и фазами отдельного мероприятия.

Математический аппарат и алгоритмы обработки входной информации, являющиеся формальной основой созданных моделей, представлены в работах [7, 14].

Заключение

Кризисные ситуации в социально-экономической сфере характеризуются высокой степенью неопределенности. Для них не может быть все заранее учтено и расписано, как в случае чрезвычайных ситуаций техногенного характера. Это ограничивает возможности применения классических логико-вероятностных моделей и методов оценки надежности и анализа рисков сложных систем в приложении к социально-экономическим процессам и объектам.

Компьютерное моделирование в задачах управления региональной безопасностью, основанное на интеграции агентного подхода с методом системной динамики, позволяет не только просчитать ходы виртуально, но и предусмотреть возможные альтернативные варианты развития ситуации и последствия для общества, не экспериментируя при этом над реальными социально-экономическими объектами. Прогностическая ценность имитационных моделей обеспечивает возможность формирования рекомендаций для принятия управленческих решений в условиях кризисных ситуаций и определения того, что стоит менять в системе регионального управления, чтобы минимизировать риски, избежать социальной напряженности, достичь экономического роста и т.п.

Созданные модели на основе описания текущей ситуации позволяют сформировать аналитическую прогнозную информацию для принятия обоснованных управленческих решений, а также предложить варианты их согласования в тех или иных условиях. В этом заключается информационная поддержка процессов управления безопасностью региона на базе предложенных моделей. Модели объединяются в едином полимодельном комплексе и используются программными агентами системы поддержки принятия решений ситуационных центров региона. Модели применяются на этапе прогнозирования динамики показателей безопасности социально-экономического развития региона по различным направлениям с учетом заданных условий и ограничений.

Полимодельный комплекс прошел апробацию при решении ряда практических задач по предупреждению и мониторингу кризисных ситуаций в сфере обеспечения экономической безопасности Мурманской области в составе информационно-аналитической системы «Прогноз» [15], официально используемой Министерством экономического развития Мурманской области и ситуационным центром региона на основе нормативно-правовых регламентов, принятых на государственном уровне.

Библиографический список

1. Информационно-аналитическая система для принятия решений на основе сети распределенных ситуационных центров / А. П. Афанасьев, Ю. М. Батулин, Е. Н. Еременко, Н. А. Кириллов, С. В. Клименко // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2010. – № 2. – С. 3 – 14.
2. *Форрестер, Дж.* Мировая динамика / Дж. Форрестер. – М. : Наука, 1978. – 165 с.
3. *Forrester, J.-W.* System dynamics – a personal view of the first fifty years / J.-W. Forrester // System Dynamics Review. – 2007. – Vol. 23, iss. 2-3. – P. 345–358.
4. *Forrester, J.-W.* System dynamics – the next fifty years / J.-W. Forrester // System Dynamics Review. – 2007. – Vol. 23, iss. 2-3. – P. 359–370.
5. *Геловани, В. А.* СССР и Россия в глобальной системе (1985 – 2030): Результаты глобального моделирования / В. А. Геловани, В. Б. Бритков, С. В. Дубовский. – М. : УРСС, 2009. – 320 с.
6. *Акаев, А. А.* Прогноз и моделирование кризисов и мировой динамики / А. А. Акаев, А. В. Коротаев, Г. Г. Малинецкий. – М. : УРСС, 2010. – 352 с.
7. *Маслобоев, А. В.* Информационное измерение региональной безопасности в Арктике / А. В. Маслобоев, В. А. Путилов. – Апатиты : КНЦ РАН, 2016. – 222 с.
8. *Путилов, В. А.* Системная динамика регионального развития / В. А. Путилов, А. В. Горохов. – Мурманск : НИЦ «Пазори», 2002. – 306 с.
9. *Сидоренко, В. Н.* Системно-динамическое моделирование в среде POWERSIM: Справочник по интерфейсу и функциям / В. Н. Сидоренко. – М. : МАКС-ПРЕСС, 2001. – 159 с.
10. *Маслобоев, А. В.* Информационная технология дистанционного формирования и управления моделями системной динамики / А. В. Маслобоев, А. Г. Олейник, М. Г. Шишаев // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2015. – Т. 15, № 4. – С. 748–755.
11. *Медоуз, Д. Х.* Пределы роста. 30 лет спустя / Д. Х. Медоуз, Й. Рандерс, Д. Л. Медоуз. – М. : ИКЦ «Академкнига», 2007. – 342 с.
12. Когнитивные центры как информационные системы для стратегического прогнозирования / И. В. Десятов, Г. Г. Малинецкий, С. К. Маненков, Н. А. Митин, П. Л. Огоцкий, В. Н. Ткачев, В. В. Ширшов // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2011. – № 1. – С. 65–81.
13. *Карпов, Ю. Г.* Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5 / Ю. Г. Карпов. – СПб. : БХВ-Петербург, 2005. – 400 с.

14. Емельянов, С. В. Информационные технологии регионального управления / С. В. Емельянов, Ю. С. Попков, А. Г. Олейник, В. А. Путилов. – М. : Едиториал УРСС, 2004. – 400 с.
15. Селянин, А. О. Информационно-аналитическая система мониторинга, анализа и прогнозирования социально-экономического развития и финансового состояния субъектов РФ / А. О. Селянин, Д. Л. Андрианов // Методология регионального прогнозирования : сб. докл. конф. – М. : СОПС, 2003. – С. 128–147.
16. Юрков, Н. К. К проблеме моделирования риска отказа электронной аппаратуры длительного функционирования / Н. К. Юрков, И. И. Кочегаров, Д. Л. Петрянин // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2015. – № 4 (32). – С. 220 – 231.
17. Медников, В. И. Параметры экономической безопасности в товарном рынке / В. И. Медников, Н. К. Юрков // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2015. – Т. 1. – С. 75–79.

References

1. Afanas'ev A. P., Baturin Yu. M., Eremenko E. N., Kirillov N. A., Klimenko S. V. *Informacionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy* [Information Technologies and Computing Systems]. 2010, no. 2, pp. 3–14.
2. Forrester J. *Mirovaya dinamika* [World Dynamics]. Moscow: Nauka, 1978, 165 p.
3. Forrester J.-W. *System Dynamics Review*. 2007, vol. 23, iss. 2-3, pp. 345–358.
4. Forrester J.-W. *System Dynamics Review*. 2007, vol. 23, iss. 2-3, pp. 359–370.
5. Gelovani V. A., Britkov V. B., Dubovsky S. V. *SSSR i Rossiya v global'noj sisteme (1985–2030): Rezul'taty global'nogo modelirovaniya* [USSR and Russia in the global system (1985-2020): Results of global modeling]. Moscow: URSS, 2009, 320 p.
6. Akayev A. A., Korotaev A. V., Malinetsky G. G. Malineckij G. G. *Prognoz i modelirovanie krizisov i mirovoj dinamiki* [Forecast and modeling of crises and world dynamics]. Moscow: URSS, 2010, 352 p.
7. Masloboev A. V., Putilov V. A. *Informacionnoe izmerenie regional'noj bezopasnosti v Arktike* [Information dimension of regional security in the Arctic]. Apatity: KNC RAN, 2016, 222 p.
8. Putilov V. A., Gorokhov A. V. *Sistemnaya dinamika regional'nogo razvitiya* [System Dynamics of Regional Development]. Murmansk: NIC «Pazori», 2002, 306 p.
9. Sidorenko V. N. *Sistemno-dinamicheskoe modelirovanie v srede POWERSIM: Spravochnik po interfejsu i funkciyam* [System-dynamic modeling in the environment POWERSIM: Reference interface and functions]. Moscow: MAKS-PRESS, 2001, 159 p.
10. Masloboev A. V., Oleinik A. G., Shishaev M. G. *Nauchno-tehnicheskij vestnik informacionnyh tekhnologij, mekhaniki i optiki* [Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics]. 2015, vol. 15, no. 4, pp. 748–755.
11. Meadows D. H., Randers Y., Meadows D. L. *Predely rosta. 30 let spustya* [Limits to growth. 30 years later]. Moscow: IKC «Akademkniga», 2007, 342 p.
12. Desyatov I. V., Malinetskiy G. G., Manenkov S. K., Mitin N. A., Ototskiy P. L., Tkachev V. N., Shirshov V. V. *Informacionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy* [Information Technologies and Computing Systems]. 2011, no. 1, pp. 65–81.
13. Karpov Yu. G. *Imitacionnoe modelirovanie sistem. Vvedenie v modelirovanie s AnyLogic 5* [Simulation modeling systems. Introduction to modeling with AnyLogic 5]. Saint-Petersburg: BHV-Peterburg, 2005, 400 p.
14. Yemelyanov S. V., Popkov Yu. S., Oleinik A. G., Putilov V. A. *Informacionnye tekhnologii regional'nogo upravleniya* [Information technologies of regional management]. Moscow: Editorial URSS, 2004, 400 p.
15. Selyanin A. O., Andrianov D. L. *Metodologiya regional'nogo prognozirovaniya: Sb. dokl. konf.* [Regional Forecasting Methodology: Coll. report conf]. Moscow: SOPS, 2003, pp. 128–147.
16. Yurkov N. K., Kochegarov I. I., Petryanin D. L. *Prikaspijskij zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [The Caspian Journal: Management and High Technologies]. 2015, no. 4 (32), pp. 220–231.
17. Mednikov V. I., Yurkov N. K. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2015, vol. 1, pp. 75–79.

Путилов Владимир Александрович

доктор технических наук, профессор,
научный руководитель организации,
заслуженный деятель науки РФ,
Институт информатики и математического
моделирования технологических процессов
Кольского научного центра РАН
(184209, Россия, Мурманская область, г. Апатиты,
ул. Ферсмана, 24А)
E-mail: putilov@iimm.ru

Putilov Vladimir Aleksandrovich

doctor of technical sciences, professor,
scientific supervisor,
honoured science worker of RF,
Institute of Informatics and mathematical
modelling of technological processes
of the Kola Science Centre RAS
(184209, 24A Fersmana street, Apatite,
Murmansk region, Russia)

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)
E-mail: masloboev@iimm.ru

Быстров Виталий Викторович

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
Институт информатики и математического
моделирования технологических процессов
Кольского научного центра РАН
(184209, Россия, Мурманская область, г. Апатиты,
ул. Ферсмана, 24А)
E-mail: vitbyst@mail.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)

Bystrov Vitaliy Viktorovich

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

УДК 004.94, 338.24

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. – DOI 10.21685/2307-4205-2018-3-17.

ОРГАНИЗАЦИЯ И БЕЗОПАСНОСТЬ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ

ORGANIZATION AND SAFETY OF ROAD TRAFFIC

УДК 656.13.021: 625.739.4

DOI 10.21685/2307-4205-2018-3-18

С. В. Виталин

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ ИНТЕНСИВНОСТИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ НА КАЧЕСТВО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПРОБЛЕМНЫХ РЕГУЛИРУЕМЫХ ПЕРЕКРЕСТКОВ

S. V. Vitolin

EFFECT OF TRAFFIC FLOW FLUCTUATIONS ON THE QUALITY FOR FUNCTIONING OF PROBLEM SIGNALIZED INTERSECTIONS

Аннотация. *Актуальность и цели.* Регулируемые перекрестки, как правило, осуществляют пропуск высокоинтенсивных транспортных потоков в стесненных условиях застройки. В крупных городах в часы «пик» регулируемые перекрестки сильно перегружены транспортом, свидетельством чего являются остаточные очереди автомобилей перед ними. Целью работы является разработка основ методологии повышения качества дорожного движения для регулируемых перекрестков на основе анализа изменения интенсивности дорожного движения и критических длин очередей. *Результаты.* В статье анализируется изменение интенсивности дорожного движения и длин очередей на регулируемом перекрестке в г. Волжский. Образующиеся очереди автомобилей на перекрестке достигают до соседних перекрестков, что приводит к сетевым заторам. Предлагается оценивать интенсивность движения не только на подходах регулируемого перекрестка, но и на проблемных выездах. Регулярные длинные остаточные очереди автомобилей перед и после регулируемого перекрестка являются свидетельством высокого транспортного спроса. Приведен пример определения уровня удобства движения по методике немецкого нормативного документа. Управлять качеством дорожного движения на регулируемом перекрестке можно с помощью оценки уровня удобства движения до проведения конструктивных или программных изменений; прогнозирования его на этапе проектирования, учитывая затраты,

Abstract. *Background.* Signalized intersections, as a rule, pass high-intensity traffic flows in crowded construction conditions. In large cities during peak hours, signalized intersections are heavily overloaded with vehicles, evidenced by the residual vehicle queue lengths in front of them. The aim of the work is to develop the foundations of a methodology for improving the quality of road traffic for signalized intersections on the basis of an analysis of changes in traffic intensity and critical queue lengths. *Results.* The article analyzes the change in traffic intensity and the length of the queues at a signalized intersection in the city of Volzhsky. The resulting queues of vehicle at a intersection reach the neighboring intersections, which leads to network congestion. It is proposed to evaluate the traffic intensity not only on the approaches of the signalized intersection, but also on problematic departures. Regular long residual queues of cars before and after the signalized intersection are evidence of high transport demand. The example of the definition of the level of service is given by the method of the German normative document. Manage the quality of traffic at a signalized intersection can be done by assessing the level of service before carrying out structural or program changes; forecasting it at the design stage, taking into account costs, availability of areas, the effect of various solutions; assessment of traffic quality after the implementation of projected activities, taking into account the perception of the quality of traffic by users. *Conclusions.* The foundations of the quality management methodology for signal-

наличие площадей, эффект от различных вариантов решений; оценки качества движения после осуществления запроектированных мероприятий, учитывая восприятие качества дорожного движения пользователями. **Выводы.** Предлагаются основы методологии менеджмента качества для регулируемых перекрестков. Укрупненными критериями оценки качества дорожного движения для регулируемого перекрестка может служить частая остаточная очередь, наличие резервов пропускной способности. Если образование протяженной очереди на регулируемом перекрестке неизбежно, то организовывать эту очередь следует на подходе, не приводящему к сетевому затору.

Ключевые слова: длина очереди автомобилей, регулируемый перекресток, интенсивность движения, транспортный спрос, уровень удобства движения.

ized intersections are proposed. Comprehensive criteria for assessing the quality of traffic for a signalized intersection can serve as a frequent residual queue, the availability of capacity reserves. If the formation of a long queue at a regulated intersection is inevitable, then it should be organized in an approach that does not lead to a network congestion.

Key words: vehicle queue length, signalized intersection, traffic volume, transport demand, level of service.

Введение

Регулируемый перекресток (РП) ул. Логинова – ул. Горького в г. Волжский в часы «пик» является перегруженным. На данном РП действует двухфазный режим работы, при этом интенсивность поворачивающих налево автомобилей с подхода 2 и 3 высокая (рис. 1–3). Максимальное допустимое значение левоповоротного потока с пересечением встречного потока для двухфазных циклов регулирования длительностью 40–70 с не должно превышать 100 авт./ч [1], 100–200 авт./ч [2]. Левоповоротный поток рекомендуется пропускать на просачивание через встречный прямой поток, от которого зависит длительность основных тактов, если его интенсивность не превышает 120 авт./ч [3]. Учитывая рекомендации и фактическую интенсивность дорожного движения рекомендуемое число фаз регулирования для данного РП – четыре. При этом повысится безопасность дорожного движения, так как транспортные потоки будут пропускаться бесконфликтно, но повысится ли качество дорожного движения [4] – это вопрос. Чем больше фаз регулирования, тем выше доля промежуточных тактов в цикле регулирования (потери общей пропускной способности РП) и дольше время ожидания разрешающего сигнала (накопление очередей большей длины за длительный запрещающий сигнал). Если поворачивающие налево автомобили способны просочиться через неинтенсивный встречный поток и не препятствуют проезду потока прямого направления, то введение дополнительных фаз регулирования, очевидно, приведет к сокращению общей пропускной способности РП.

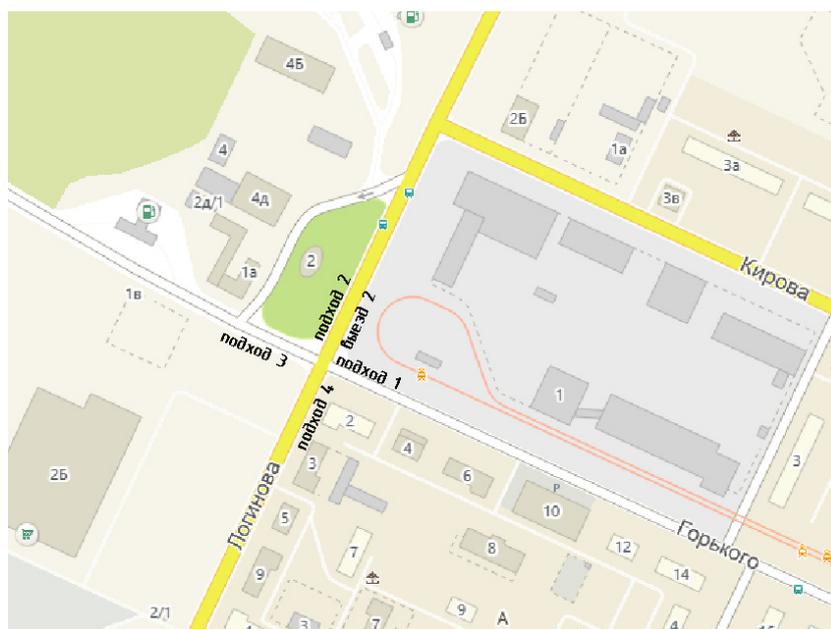


Рис. 1. Схема обозначения подходов и проблемного выезда регулируемого перекрестка в г. Волжский

При измерении интенсивности дорожного движения по направлениям на РП считается количество автомобилей проходящих через стоп-линию (или условную линию в створе светофора). Когда уровень загрузки РП близок единице (на каждом подходе), измеряя интенсивность дорожного движения в сечении стоп-линии определяют практическую пропускную способность при данных дорожно-транспортных и сигнально-технических условиях. Наличие очереди автомобилей [5] в конце периода наблюдений свидетельствует о том, что транспортный спрос [6] на проезд через данное сечение выше, чем пропускная способность.

часовая интенсивность движения											
			подход 4								
			12	11	10						
			направо	прямо	налево						
			128	382	71						
подход 1	1	налево	92				61	направо	9	подход 3	
	2	прямо	167				251	прямо	8		
	3	направо	190				251	налево	7		
			379	579	283						
			налево	прямо	направо				сумма		
			4	5	6				2833		
			подход 2								

Рис. 2. Интенсивность дорожного движения в вечерний час «пик» на рассматриваемом регулируемом перекрестке в приведенных единицах к легковым автомобилям

часовая интенсивность движения											
			подход 4								
			12	11	10						
			направо	прямо	налево						
			75	450	46						
подход 1	1	налево	44				41	направо	9	подход 3	
	2	прямо	266				164	прямо	8		
	3	направо	290				381	налево	7		
			279	357	250						
			налево	прямо	направо				сумма		
			4	5	6				2644		
			подход 2								

Рис. 3. Интенсивность дорожного движения в утренний час «пик» на рассматриваемом регулируемом перекрестке в приведенных единицах к легковым автомобилям

Анализ изменения интенсивности дорожного движения на регулируемом перекрестке

На рассматриваемом РП в утренний и обеденный часы «пик» наблюдалась очередь автомобилей на выезде 2 до РП на ул. Кирова (рис. 4).

При подсчете интенсивности дорожного движения пропускная способность выезда 2 (транспортный спрос РП на ул. Кирова) была ограничена пропускной способностью подхода РП на ул. Кирова, особенно долго в утренний час «пик». В этот период интенсивность движения на выезде 2 была наиболее высокой (рис. 5). В вечерний час «пик» наблюдалась наиболее протяженная очередь за весь период наблюдений на подходе 2. Интенсивность движения в этот период на подходе 2 также была самой высокой (см. рис. 5).

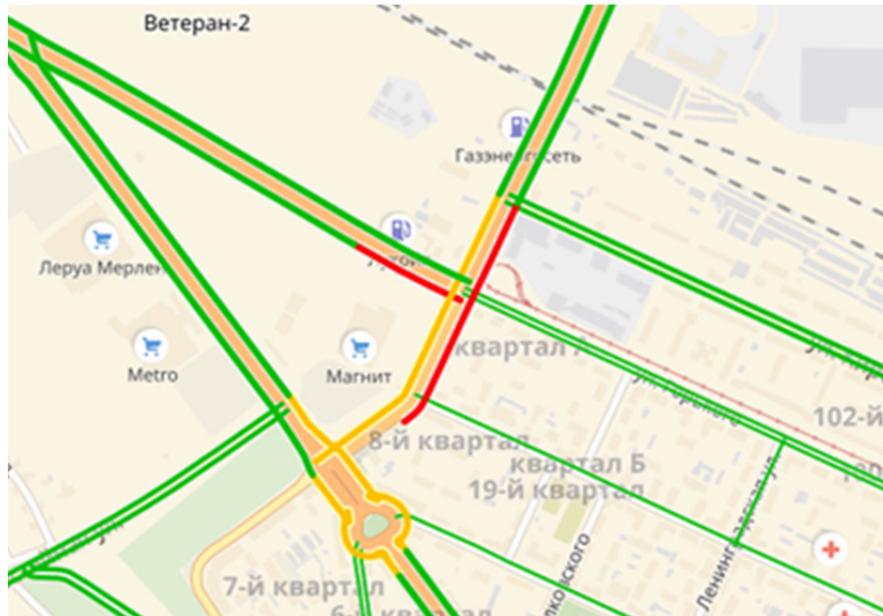


Рис. 4. Загрузка рассматриваемого регулируемого перекрестка в утренний час «пик» на основе данных сервиса «яндекс-пробки»

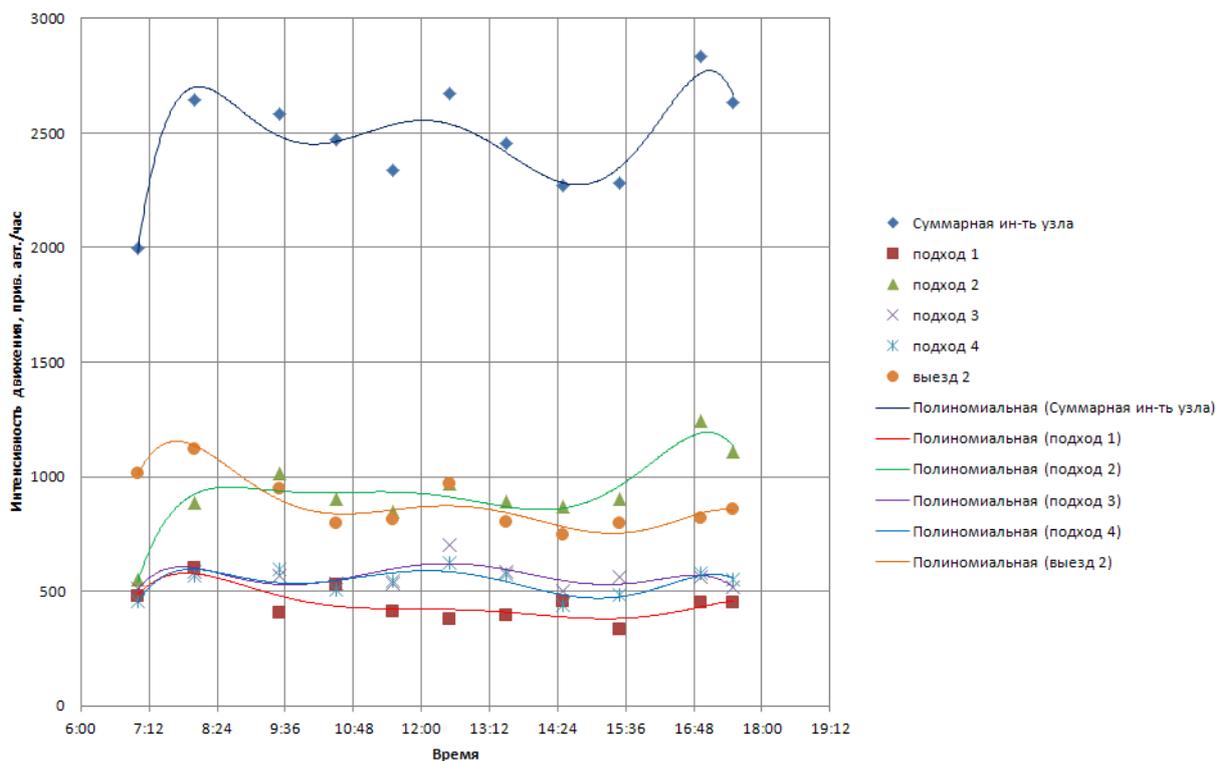


Рис. 5. Изменение интенсивности движения на рассматриваемом регулируемом перекрестке

Основы методологии повышения качества дорожного движения на регулируемом перекрестке

Для условий недостаточного финансирования транспортной инфраструктуры, по мнению автора, менеджмент качества [7, 8], основанный на четких методиках принятия оптимальных решений, может способствовать повышению качества дорожного движения РП. Управлять качеством дорожного движения на РП можно с помощью оценки уровня удобства движения (УУД) до проведения конструктивных или программных изменений; прогнозирования УУД на этапе проекти-

рования, учитывая затраты, наличие площадей, эффект от различных вариантов решений; оценки качества движения после осуществления запроектированных мероприятий, учитывая восприятие качества дорожного движения пользователями (рис. 6). При этом можно оценить разницу между ожидаемым, желаемым, достигнутым и воспринимаемым качеством, обнаружить просчеты и ошибки, производительность проводивших проектные и строительные работы организаций [9, 10].



Рис. 6. Круговорот качества при управлении дорожным движением [8]

Введение системы качества должно способствовать непрерывному улучшению качества. На рис. 7 представлена общая схема для управления системой качества.

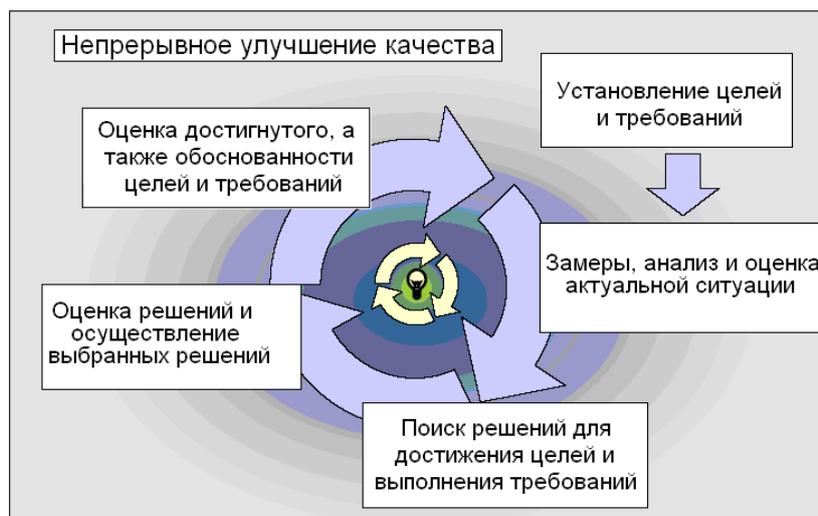


Рис. 7. Общий принцип последовательности действий для улучшения системы качества [8]

Общий уровень удобства движения на регулируемом перекрестке должен определяться по сигнальной группе с самыми плохими условиями движения (самые большие задержки и степень загрузки). На рис. 8 показан пример оценки уровня удобства движения на регулируемом перекрестке согласно немецкому нормативному документу HBS 2001.

Если отсутствуют возможности для улучшения условий движения всех сигнальных групп на перекрестке, то необходимо обеспечить приемлемый УУД на приоритетных направлениях (например, поток со значительной долей общественного транспорта, тем самым обеспечивая максимальную эффективность использования провозной способности транспорта).

Учитывая вышеприведенное, можно сделать вывод, что при проектировании РП и расчете светофорных программ нужно обращать внимание не только на пропускную способность, но и на обеспечение желаемого уровня удобства движения для определенных групп участников дорожного движения.

Регулируемый перекресток																						
Обоснование УУД согласно НБС 2001, Formblatt 3																						
Тabelle xx																						
Перекресток:		Проспект Жукова / ул. им. Рокоссовского																				
Расчетный период:		будничный пиковый период																			Прогноз	
		цикл	tc=	90	с			T=	3600	с												
№	Подход	Поток	t _с	f	t _з	q	m	q _з	t _з	n _с	C	g	N _{оэ}	n _н	h	S	N _{яэ}	l _{зв}	w	QSV	Lb	
			с	---	с	авт/час	авт	авт/час	с/авт	авт	авт/час	---	авт	авт	%	%	авт	м	с			
1	Р-Ж (1 подход)	налево	28	0,31	62	450	11,3	1 800	2,0	14	560	0,80	2	10,9	97	95	15	88,9	40,3	C		
2		пр+налево	28	0,31	62	533	13,3	2 020	1,8	16	628	0,85	2	13,3	100	95	17	103,0	42,0	C		
3		пр+направо	28	0,31	62	533	13,3	2 020	1,8	16	628	0,85	2	13,3	100	97	18	105,5	42,0	C		
4	Р-Ж (2 подход)	налево	10	0,11	80	173	4,3	1 800	2,0	5	200	0,87	3	4,3	100	95	11	67,4	92,9	E	312	
5		прямо	29	0,32	61	878	22,0	3 675	1,0	30	1 184	0,74	1	19,8	90	95	22	135,0	29,9	B		
6		направо	17	0,19	73	174	4,4	1 800	2,0	9	340	0,51	0	3,9	90	96	7	40,9	32,8	B		
7	Р-Ж (3 подход)	пр+налево	17	0,19	73	367	9,2	1 840	2,0	9	348	1,06	29	9,2	100	95	47	280,1	337,6	F	370	
8		прямо	17	0,19	73	367	9,2	1 840	2,0	9	348	1,06	29	9,2	100	95	47	280,1	337,6	F		
9		пр+направо	17	0,19	73	368	9,2	1 840	2,0	9	348	1,06	30	9,2	100	97	48	290,3	346,2	F		
10	Р-Ж (4 подход)	налево	29	0,32	61	428	10,7	1 800	2,0	15	580	0,74	1	9,8	92	95	13	79,1	33,7	B	347	
11		прямо	29	0,32	61	1 416	35,4	3 770	1,0	30	1 215	1,17	206	35,4	100	95	256	1535,1	644,2	F		
12		направо	28	0,31	62	264	6,6	2 175	1,7	17	677	0,39	0	5,2	78	96	8	49,7	24,3	B		
			сумма	q _к =	5 951	авт/час	сумма	C _к =	7 055	авт/час	ḡ =	1										
Общий уровень удобства движения: F																						
t _с	разрешающий сигнал	n _с	проп. спос. за цикл	N _{яэ}	число автом. в очереди в конце красного	Средняя задержка		QSV														
f	доля разрешающего сигнала	C	проп. спос. полосы	l _{зв}	длина очереди	<= 20 с		A														
t _з	период блокирования	g	степень насыщения	w	средняя задержка	<= 35 с		B														
q	интенсивность	N _{оэ}	число автом. в очереди в конце зеленого	QSV	УУД	<= 50 с		C														
m	сп. ожидаемое число	n _н	число останавливающихся автом. за цикл	t _ц	длительность цикла	<= 70 с		D														
q _з	поток насыщения	h	доля останавливающихся автомобилей	T	рассматриваемый период	<= 100 с		E														
t _з	сп. временной ин-л	S	статистическая надежность	Lb	расчетная нагрузка	>		F														
условно совместимых повороч. налево																						

Рис. 8. Пример оценки общего уровня удобства движения на регулируемом перекрестке в г. Волгоград согласно немецкому нормативному документу

Заключение

При близком расположении регулируемых перекрестков и высокой интенсивности дорожного движения на них (очереди автомобилей достигают соседних РП) для нахождения мероприятий по повышению качества дорожного движения необходимо рассматривать систему таких РП, как транспортный узел. Нужно оценивать не только интенсивности дорожного движения на подходах и на проблемных выездах РП, но и оценивать транспортный спрос для подходов, где образуются остаточные очереди. Детальная диагностика транспортных узлов требует значительных временных и финансовых ресурсов (рис. 9).



Рис. 9. Оценка качества дорожного движения на РП в зависимости от исходных данных

Укрупненными критериями оценки качества дорожного движения на РП может служить частая остаточная очередь, наличие резервов пропускной способности (не используемый разрешающий сигнал или наличие значительных разрывов в транспортном потоке при проезде РП).

Если образование протяженной очереди на РП неизбежно, то организовывать эту очередь следует на подходе, не приводящему к сетевому затору (очередь автомобилей не затрагивает соседние перекрестки). Внедрение автоматизированных систем управления дорожным движением высокого поколения (автоматизированный учет и адаптивное реагирование на изменения), а также введение системы транспортного менеджмента способны существенно повысить эффективность функционирования транспортных систем и их элементов [6].

Библиографический список

1. Методические рекомендации по разработке и реализации мероприятий по организации дорожного движения. Организация дорожного движения на регулируемых пересечениях // ОАО «Научно-исследовательский институт автомобильного транспорта». – М., 2017.
2. ОДМ 218.2.020-2012 Методические рекомендации по оценке пропускной способности автомобильных дорог. – М., 2013.
3. ОДМ 218.6.003-2011 Методические рекомендации по проектированию светофорных объектов на автомобильных дорогах. – М., 2013.
4. *Витолин, С. В.* Качество дорожного движения на регулируемом перекрестке / С. В. Витолин, М. М. Девятов // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Сер.: Строительство и архитектура. – 2009. – № 16. – С. 72–76.
5. *Витолин, С. В.* Значение длины очереди автомобилей перед светофорным объектом и современные подходы к ее оценке / С. В. Витолин // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – 2016. – № 4 (50). – С. 53–58.
6. *Витолин, С. В.* Управление транспортными потоками при перегрузках на улично-дорожной сети города / С. В. Витолин // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2017. – Т. 21, № 12. – С. 211–219.
7. *Витолин, С. В.* Совершенствование транспортных потребительских свойств изолированных регулируемых перекрестков улично-дорожной сети города : дис. ... канд. техн. наук / Витолин С. В. – Волгоград, 2014. – 169 с.
8. *Reußwig, A.* Qualitätsmanagement für Lichtsignalanlagen : dissertation zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs, technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Verkehrsplanung und Verkehrstechnik / A. Reußwig. – Deutschland, 2005.
9. *Дивеев, А. И.* Синтез системы управления на основе аппроксимации множества оптимальных траекторий методом сетевого оператора / А. И. Дивеев, Е. Ю. Шмалько // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 4 (8). – С. 3–10.
10. *Катулев, А. Н.* Метод оценки показателей структурной безопасности функционирования нелинейных автономных динамических систем / А. Н. Катулев, Н. А. Северцев // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 2 (14). – С. 3–8.

References

1. *Metodicheskie rekomendacii po razrabotke i realizacii meropriyatij po organizacii dorozhnogo dvizheniya. Organizaciya dorozhnogo dvizheniya na reguliruemym peresecheniyah* [Guidelines for the development and implementation of measures for the organization of traffic. Traffic management at regulated intersections.] Open Society "Research institute of the motor transport. Moscow, 2017.
2. ODM 218.2.020-2012 *Metodicheskie rekomendacii po ocenke propusknoj sposobnosti avtomobil'nyh dorog* [Guidelines for assessing the capacity of roads]. Moscow, 2013.
3. ODM 218.6.003-2011 *Metodicheskie rekomendacii po proektirovaniyu svetofornyh ob"ektov na avtomobil'nyh dorogah* [Guidelines for the design of traffic lights on highways]. Moscow, 2013.
4. Vitolin S. V. *Vestnik VolgGASU. Str-vo i arhitektura* [VolgGASU Bulletin. Page and architecture]. 2009, no. 16, pp. 72–76.
5. Vitolin S. V. *Vestnik SibADI* [SibADI Bulletin]. 2016, no. 4 (50), pp. 53–58.
6. Vitolin S. V. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Irkutsk state technical University]. 2017, vol. 21, no. 12, pp. 211–219.
7. Vitolin S. V. *Sovershenstvovanie transportnyh potrebitel'skih svojstv izolirovannyh reguliruemym perekrestkov ulichno-dorozhnoj seti goroda, dissertaciya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk* [Improvement of the transport consumer properties of isolated regulated intersections of the city's road network, dissertation for the degree of candidate of technical sciences]. Volgograd, 2014, 169 p.

8. Reuβwig A. *Qualitätsmanagement für Lichtsignalanlagen: dissertation zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs, technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Verkehrsplanung und Verkehrstechnik* [Quality management for traffic signal systems: dissertation to obtain the academic degree of a Doktor-Ingenieur, technische Universität Darmstadt, transport planning and traffic engineering]. 2005.
9. Diveev A. I., SHmal'ko E. Yu. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnyh sistem* [Reliability and quality of complex systems]. 2014, no. 4 (8), pp. 3–10.
10. Katulev A. N., Severtsev N. N. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnyh sistem* [Reliability and quality of complex systems]. 2016, no. 2 (14), pp. 3–8.

Витолин Сергей Владимирович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра исследования и проектирования
транспортных сооружений,
Волгоградский государственный
технический университет
(400005, Россия, г. Волгоград,
проспект им. Ленина, 28)
E-mail: vitolinsv@mail.ru

Vitolin Sergey Vladimirovich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of investigation and design
of transport buildings,
Volgograd State Technical University
(28 Lenin avenue, Volgograd, Russia)

УДК 656.13.021: 625.739.4

Витолин, С. В.

Влияние изменений интенсивности дорожного движения на качество функционирования проблемных регулируемых перекрестков / С. В. Витолин // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 3 (23). – С. 159–166. – DOI 10.21685/2307-4205-2018-3-18.