

## СОДЕРЖАНИЕ

### ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПРОБЛЕМ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА

**Абрамов О. В.**

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ И ПЛАНИРОВАНИЕ  
ЭКСПЛУАТАЦИИ СИСТЕМ ОТВЕТСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ..... 5

**Самокутяев А. М., Шиндин В. В.**

ОБ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ  
ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ..... 15

**Подкопаев А. В., Подкопаев И. А.**

ЦЕНТРАЛИЗОВАННЫЙ АДАПТИВНЫЙ АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ БЕЗОТКАЗНОСТИ  
СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ РАЗЛИЧНОЙ ЭНТРОПИИ..... 20

**Тюгашев А. А.**

ПРОБЛЕМЫ НАДЕЖНОГО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ  
СЛОЖНЫМИ СИСТЕМАМИ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ..... 28

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

ОБ УЧЕТЕ СВОЙСТВА НЕОБРАТИМОСТИ ПРОЦЕССОВ В ЗАДАЧАХ ОЦЕНКИ  
ДОЛГОВЕЧНОСТИ СТРУКТУРНО И ФУНКЦИОНАЛЬНО СЛОЖНЫХ СИСТЕМ ..... 37

### ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

**Зеленцов Б. П.**

МОДЕЛЬ НАДЕЖНОСТИ ОБЪЕКТА ПРИ НЕДОСТОВЕРНОМ КОНТРОЛЕ..... 46

**Григорьев А. В., Кочегаров И. И., Юрков Н. К., Реута Н. С., Лапшин Э. В.**

СПОСОБ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ДВИЖУЩИХСЯ МЕХАНИЗМОВ  
НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ВИБРАЦИОННОГО  
РАЗМЫТИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ ТЕСТОВОГО ОБЪЕКТА КРУГЛОЙ ФОРМЫ..... 55

**Юрков Н. К., Прошин А. А., Горячев Н. В.**

СИНТЕЗ СТРУКТУРЫ МНОГОКАНАЛЬНОЙ  
ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ..... 64

### ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ

**Иванов А. И., Кубасов И. А., Самокутяев А. М.**

ТЕСТИРОВАНИЕ БОЛЬШИХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ НА МАЛЫХ ВЫБОРКАХ ..... 72

|                                                                                                                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Дарьина А. Н., Прокопьев И. В.</b><br>МЕТОД ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ КОНТРОЛЛЕРА БЕСПИЛОТНОГО<br>ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА НА ОСНОВЕ ОПТИМИЗАЦИИ РОЯ ЧАСТИЦ .....                               | 80 |
| <b>Боков А. С., Важенин В. Г., Мухин В. В., Иофин А. А.</b><br>ПРИМЕНЕНИЕ ПРОТОКОЛА UDP И МАТЛАВ В КАЧЕСТВЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЯДРА<br>ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ КОМПЛЕКСА МОДЕЛИРОВАНИЯ СИГНАЛОВ РАС ..... | 88 |
| <b>Прокопьев И. В., Софронова Е. А.</b><br>ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА ИДЕНТИФИКАЦИИ МОДЕЛИ<br>И МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫМ ТРАНСПОРТНЫМ<br>СРЕДСТВОМ ПО ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ТРАЕКТОРИИ .....        | 99 |

## БЕЗОПАСНОСТЬ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

|                                                                                                                                                                         |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Маслобоев А. В.</b><br>ТЕХНОЛОГИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА И КОНФИГУРИРОВАНИЯ<br>МУЛЬТИАГЕНТНЫХ СИСТЕМ СЕТЕЦЕНТРИЧЕСКОГО<br>УПРАВЛЕНИЯ РЕГИОНАЛЬНОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ ..... | 112 |
| <b>Кубасов И. А.</b><br>МЕТОДИКА КАТЕГОРИРОВАНИЯ ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНЫХ ОБЪЕКТОВ<br>ПО СТЕПЕНИ ЗАЩИЩЕННОСТИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЛОГАРИФМИЧЕСКОЙ ШКАЛЫ .....                     | 121 |
| <b>Старостин И. Е.</b><br>ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕШЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛЬНО-ПОТОКОВЫМ<br>МЕТОДОМ ЗАДАЧ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМ ИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ<br>ИСПЫТАНИЙ ЭТИХ СИСТЕМ..... | 128 |

# RELIABILITY AND QUALITY OF COMPLEX SYSTEMS

№ 3 (31) 2020

## CONTENT

### FUNDAMENTALS OF RELIABILITY AND QUALITY ISSUES

**Abramov O. V.**

STATE PREDICTION AND CONDITION-BASED MAINTENANCE  
OF COMPLEX ENGINEERING SYSTEMS UNDER HEAVY-DUTY SERVICE.....5

**Samokutyaev A. M., Shindin V. V.**

ABOUT THE ROAD SAFETY INFORMATION SYSTEM IN THE RUSSIAN FEDERATION .....15

**Podkopaev A. V., Podkopaev I. A.**

CENTRALIZED ADAPTIVE ALGORITHM FOR EVALUATING THE RELIABILITY  
OF COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS OF VARIOUS ENTROPY.....20

**Tyugashev A. A.**

PROBLEMS OF RELIABLE INTELLIGENT MANAGEMENT  
OF COMPLEX SYSTEMS IN REAL TIME.....28

**Ostreykovsky V. A., Shevchenko E. N.**

ON TAKING INTO ACCOUNT THE PROPERTIES OF IRREVERSIBILITY  
OF PROCESSES IN THE PROBLEMS OF ASSESSING THE DURABILITY  
OF STRUCTURALLY AND FUNCTIONALLY COMPLEX SYSTEMS .....37

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

**Zelentsov B. P.**

DEPENDABILITY MODEL OF AN ITEM UNDER UNRELIABLE CHECK-OUT OPERATIONS .....46

**Grigor'ev A. V., Kochegarov I. I., Yurkov N. K., Reuta N. S., Lapshin E. V.**

METHOD FOR CONTROLLING THE TECHNICAL CONDITION  
OF MOVING MECHANISMS BASED ON STATISTICAL ANALYSIS  
OF VIBRATION BLURING IMAGES OF A TEST OBJECT ROUND FORM.....55

**Yurkov N. K., Proshin A. A., Goryachev N. V.**

SYNTHESIS OF THE STRUCTURE OF A MULTI-CHANNEL  
DATA-MEASUREMENT SYSTEM.....64

### TECHNOLOGICAL BASIS FOR IMPROVING RELIABILITY AND PRODUCT QUALITY

**Ivanov A. I., Kubasov I. A., Samokutyaev A. M.**

TESTING LARGE NEURAL NETWORKS ON SMALL SAMPLES .....72

**Daryina A. N., Prokopiev I. V.**

AN OPTIMIZATION METHOD OF THE UNMANNED VEHICLE CONTROLLER'S  
PARAMETERS BASED ON THE OPTIMIZATION OF PARTICLES'S ROY ..... 80

**Bokov A. S., Vazhenin V. G., Mukhin V. V., Iofin A. A.**

COMPLEX OF MODELING OF RADAR SIGNALS USING THE UDP PROTOCOL  
AND MATLAB AS A COMPUTING CORE ..... 88

**Prokopyev I. V., Sofronova E. A.**

STUDY ON MODEL IDENTIFICATION METHOD AND CONTROL METHODS  
FOR UNMANNED VEHICLE MOVEMENT ALONG A SPATIAL PATH ..... 99

## **SAFETY IN EMERGENCY SITUATIONS**

**Masloboev A. V.**

A TECHNOLOGY FOR DYNAMIC SYNTHESIS AND CONFIGURATION  
OF MULTI-AGENT SYSTEMS OF REGIONAL SECURITY  
NETWORK-CENTRIC CONTROL ..... 112

**Kubasov I. A.**

METHODOLOGY FOR CATEGORIZING POTENTIALLY HAZARDOUS OBJECTS  
BY DEGREE OF PROTECTION USING LOGARITHMIC SCALE ..... 121

**Starostin I. E.**

SOFTWARE IMPLEMENTATION OF SOLVING BY POTENTIAL-STREAMING  
METHOD THE PROBLEMS OF CONSTRUCTION OF SYSTEM MODELS  
FROM TEST RESULTS OF THESE SYSTEMS ..... 128

# ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПРОБЛЕМ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА

## FUNDAMENTALS OF RELIABILITY AND QUALITY ISSUES

УДК 65.012.122

DOI 10.21685/2307-4205-2020-3-1

О. В. Абрамов

### ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ И ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ СИСТЕМ ОТВЕТСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

O. V. Abramov

#### STATE PREDICTION AND CONDITION-BASED MAINTENANCE OF COMPLEX ENGINEERING SYSTEMS UNDER HEAVY-DUTY SERVICE

**Аннотация.** Рассматривается задача индивидуально-го прогнозирования состояния и планирования эксплуатации (технического обслуживания по фактическому состоянию) сложных систем ответственного назначения. Предложены методы и алгоритмы ее решения в условиях дефицита исходной информации о статистических свойствах результатов контроля.

**Ключевые слова:** параметр, работоспособность, техническая система, надежность, параметрический отказ, прогнозирование, техническое обслуживание.

**Abstract.** A problem of predicting individually the state and condition-based maintenance of complex engineering systems is considered. An approach for solving this problem is based on the construction of the special minimax and robust algorithms, which can be used in the case when inspection data are incomplete and insufficient.

**Keywords:** parameter, working capacity, complex engineering system, reliability, parametrical refusal, state prediction, maintenance.

#### Введение

Поддержание устройств и систем, предназначенных для длительной эксплуатации, в работоспособном состоянии осуществляется путем их технического обслуживания. Под техническим обслуживанием понимают все мероприятия, направленные на сохранение и восстановление работоспособности системы. Техническое обслуживание может осуществляться на основе одной из трех стратегий:

- 1) техническое обслуживание, определяемое отказами или поломками (Break Down Maintenance);
- 2) обслуживание через определенные интервалы времени (Time Based Maintenance);
- 3) обслуживание по фактическому состоянию (Condition Based Maintenance).

Стратегия планирования эксплуатации технических систем в зависимости от их фактического состояния привлекает в последнее время все большее внимание специалистов. Такую стратегию

называют еще индивидуальной, поскольку она ориентирована на реальное состояние и учитывает особенности данной конкретной системы, а не опыт эксплуатации аналогичных систем и статистические данные, для корректного использования которых необходима статистическая однородность и существенный объем используемой информации.

Эффект от перехода к индивидуальному принципу назначения моментов технического обслуживания определяется главным образом следующими факторами:

а) возможностью в наибольшей степени использовать ресурс каждого отдельного объекта, что достигается уменьшением числа преждевременных вмешательств в его работу;

б) возможностью предотвращения отказов, что обеспечивается своевременным проведением профилактических (предупредительных) мероприятий.

Индивидуальное планирование эксплуатации возможно при условии получения текущей информации о действительном состоянии каждого объекта, т.е. реализация индивидуальной стратегии эксплуатации требует непрерывного или дискретного контроля и анализа состояния объекта. Предполагается, что реальное техническое состояние объекта можно оценить по результатам контроля (измерения) его параметров, а прогнозирование их изменений позволяет эксплуатировать объект до появления признаков опасного снижения надежности, исключив при этом преждевременные демонстрации узлов и агрегатов, а также выполнение других трудоемких работ, имеющих зачастую сомнительную полезность для надежности функционирования.

Прогнозирование состояния и надежности играет важную роль при индивидуальном планировании эксплуатации. Умение предсказать возможный момент отказа особенно важно для объектов ответственного назначения, потеря работоспособности которых связана с большими материальными потерями или катастрофическими последствиями. Предотвращение отказов является для таких объектов первостепенной задачей [1].

Основные трудности при решении задачи прогнозирования для синтеза стратегии эксплуатации по состоянию связаны с тем, что прогноз приходится осуществлять для каждого объекта индивидуально, при малых объемах исходной информации (по небольшому набору результатов контроля) и в присутствии помех (ошибок контроля), статистические свойства которых достоверно не известны. В этих условиях классические методы математической статистики и теории случайных процессов теряют свои привлекательные свойства, а их использование для прогнозирования приводит к существенным ошибкам и невысокой достоверности прогноза.

Ниже будут рассмотрены некоторые подходы к решению задачи индивидуального прогнозирования и планирования эксплуатации при дефиците и неполной достоверности исходной информации, позволяющие получать в этих условиях достаточно надежные результаты.

### Общая постановка задачи индивидуального прогнозирования

В общем виде задача индивидуального прогнозирования сводится к оценке, наблюдаемой в присутствии ошибок на интервале  $T_p \subset T$ , где  $T$  – интервал эксплуатации, реализации случайного процесса дрейфа выходных координат объекта  $y(t)$  при  $t \in T \setminus T_p$ . Рассмотрим постановку такой задачи.

Пусть изменения состояния объекта на интервале эксплуатации могут быть описаны как

$$y(t) = \mathbf{a}^T \cdot \mathbf{u}(t) + h(t), t \in T, \quad (1)$$

где  $\mathbf{a} = \{a_j\}_{j=0}^n$  – набор случайных коэффициентов;  $\mathbf{u} = \{u_j(t)\}_{j=0}^n$  – непрерывные детерминированные функции времени;  $h(t)$  – ошибка модели, для которой выполняется

$$|h(t)| \leq f(t), \quad (2)$$

где  $f(t)$  – заданная функция. Представление (1) можно рассматривать как некоторое разложение  $y(t)$  по координатному базису  $\{u_j(t)\}_{j=0}^n$ .

Реализация случайного процесса  $y(t)$  наблюдается на интервале  $T_p \subset T$  с аддитивной ошибкой  $e(t)$ . Наблюдения образуют последовательность  $\mathbf{z} = \{z(t_k)\}_{k=1}^p, t_k \in T_p \subset T$ . Вероятностные свойства  $e(t)$  не определены, а известно только, что

$$|e(t_k)| \leq c(t_k), t_k \in T_p \subset T, \quad (3)$$

где  $c(t)$  – заданная функция.

Модель (1), ограничения (2), (3) на помехи и измерения  $z$ ,  $t_k \in T_p \subset T$  составляют совокупность исходных сведений для решения задачи индивидуального прогнозирования. Ограниченность и неопределенность этих сведений, в частности, отсутствие достоверных сведений о вероятностных характеристиках возмущающих факторов, затрудняет получение оценок  $y(t), t \in T \setminus T_p$  с использованием известных статистических методов, таких как методы наименьших квадратов, наименьших модулей и др. Более пригодным здесь может быть построение искомым оценок из расчета на «наихудший» случай, т.е. на основе принципа минимакса.

Рассмотрим некоторые алгоритмы поиска минимаксных оценок  $y(t), t \in T \setminus T_p$ .

### Алгоритм индивидуального гарантированного прогноза

Пусть в зависимости (1) модельные ошибки отсутствуют, т.е.

$$y(t) = a^T \cdot u(t), t \in T. \quad (4)$$

Предположим, что возможен непрерывный контроль  $y(t)$ , в результате которого получена реализация  $z(t)$  на интервале  $T_p \subset T$ . Тогда с учетом (3) можно записать

$$z(t) - c(t) \leq y(t) \leq z(t) + c(t), t \in T_p \subset T. \quad (5)$$

Из выражения (5) следует, что на интервале  $T_p$  истинная реализация  $y(t)$  заключена в «трубке», ограниченной функциями  $z(t) - c(t)$  и  $z(t) + c(t)$ . В этой трубке находится множество реализаций вида (1), которые назовем допустимыми. Для прогнозирования процесса  $y(t)$  при  $t \in T \setminus T_p$  выделим из этого множества «наихудшие», т.е. такие, которые при  $t \in T \setminus T_p$  идут выше или ниже остальных [2].

Можно показать, что при наложении некоторых ограничений на функции  $u = \{u_j(t)\}_{j=0}^n$ , в частности, если данные функции образуют на интервале  $T$  систему Чебышева, такими «наихудшими» реализациями будут экстремальные полиномы Карлина  $y(t)^-$  и  $y(t)^+$  [2]. Кривые  $y(t)^-$  и  $y(t)^+$  выделяют при  $t \in T \setminus T_p$  так называемый «конус прогноза» в том смысле, что действительная реализация исследуемого процесса гарантированно находится внутри этого конуса при  $t \in T \setminus T_p$ .

Построим алгоритм нахождения экстремальных реализаций с учетом дискретности контроля. Можно показать, что в такой ситуации поиск  $y(t)^-$  и  $y(t)^+$  сводится к решению двух задач линейного программирования [2]:

$$\begin{aligned} 1) & \max a^T u(t^*), \\ 2) & \min a^T u(t^*), t^* \in T \setminus T_p, \end{aligned}$$

при ограничениях  $z(t_k) - c(t_k) \leq a^T u(t_k) \leq z(t_k) + c(t_k), k = \overline{1, p}$ .

Рассматриваемый алгоритм прогнозирования отвечает общим требованиям, предъявляемым на практике к любой прогнозирующей процедуре. Он обладает свойством оптимальности (в минимаксном смысле), однозначности и несмещенности. Кроме ошибок измерений, в данном алгоритме можно учитывать и другие погрешности, в том числе и модельные ошибки в зависимости (1). Их учет соответствует аддитивному введению ограничений (2) в ограничения (3) и не оказывает принципиального влияния на процедуру построения «конуса прогноза». Если же базовая модель  $y(t)$  содержит структурные ошибки, то для повышения точности прогноза можно использовать специ-

альный алгоритм с адаптацией. Основная идея такого алгоритма аналогична принципам, заложенным в методах скользящего среднего или экспоненциального сглаживания и состоящим в задании различных весов результатам измерений [2].

Рассмотренный алгоритм связан с совместной обработкой исходных данных. В некоторых ситуациях предпочтительнее может быть обработка исходной информации в темпе ее поступления, т.е. рекуррентно.

### Рекуррентный алгоритм индивидуального прогноза

Рекуррентный минимаксный алгоритм индивидуального прогнозирования можно построить как некоторый оптимальный фильтр. Такие фильтры известны в теории и практике управления. В частности, за базовый здесь можно взять минимаксный фильтр, предназначенный для идентификации объектов управления [3].

С учетом структуры данного фильтра построение на его основе алгоритма индивидуального прогнозирования состояния объекта требует представления модели прогнозируемого процесса в разностной форме и описания ограничений на величины модельных ошибок и ошибок контроля в виде некоторых эллипсоидов.

Приведение модели (1) к разностной форме несложно выполнить, рассматривая коэффициенты  $\{a_j\}_{j=0}^n$  как параметры пространства состояния. При этом прогнозирование состояния технического объекта сводится к определению  $\alpha$  по данным наблюдений  $\{z(t_k)\}_{k=1}^p$ , т.е. к решению задачи, исходным для которого является

$$\begin{aligned}\alpha_{j+1} &= \Phi a_j + h_j^*, \\ Z_t^* &= H_t \cdot a_t + e_t^*,\end{aligned}\quad (6)$$

где  $\Phi = 1$  – единичная матрица,  $h_j^* = \{h_j^*\}_{j=0}^n$  – ошибки модели,  $Z_t^*$  – вектор наблюдений,  $Z_t^* = \{z(t_s)\}_{s=k}^{k+n+1}$ ,  $k = \overline{1, p-n-1}$ ,  $t_s \in T_p \subset T$ ,  $n+1 \geq 2$ ;  $e_t^* = \{e(t_s)\}_{s=k}^{k+n+1}$ ,  $k = \overline{1, p-n-1}$ ,  $t_s \in T_p \subset T$ ,  $n+1 \geq 2$ ,  $e_t^*$  – ошибки контроля;  $H_t = \Phi_t^T \otimes I$  ( $\otimes$  – кронекеровское произведение матриц),  $\Phi_t^T = \{\phi_j\}_{j=0}^n$ ,  $t \in T_p \subset T$ .

Ограничения на  $h_t^*$  и  $e_t^*$  в (4) должны быть заданы как

$$Q = \bigcup_{t \in T_p} \{G_t(B_t \cdot b_t) \cap F_t(\Gamma_t, \Gamma_t)\} \leq r^2, \quad (7)$$

где  $h_t^*$ ,  $e_t^* \in Q$ ,  $\forall t \in T_p$ ;  $G_t$  и  $F_t$  – эллипсоиды с параметрами  $B_t$ ,  $b_t$  и  $\Gamma_t$ ,  $\Gamma_t$  соответственно;  $r$  – известная постоянная.

Переход от описаний (2), (3) к описанию (7) можно осуществить, построив с учетом (2) и (3) область вариаций значений для  $h_t^*$  и  $e_t^*$  как  $Q^* = \bigcup_{t \in T_p} (G_t^* \cup F_t^*)$ , где  $G_t^*$  и  $F_t^*$  – ортогональные параллелепипеды, и аппроксимировав  $G_t^*$  и  $F_t^*$  описанными эллипсоидами  $G_t$  и  $F_t$ . С точки зрения минимаксного подхода такая аппроксимация вполне допустима, так как она не приводит к снижению достоверности исходной информации.

Построение  $G_t^* \ni h_t^*$  несложно выполнить на основе решения задач линейного программирования вида

$$\{h_i\}_{i=0}^n \Rightarrow \max \text{ и } \{h_i\}_{i=0}^n \Rightarrow \min \quad (8)$$

при ограничениях

$$h_t^* u_t \leq f_t, t \in T_p \subset T.$$

Параллелепипед  $F_t^* \ni e_t^*$  определяет условие

$$\left| \{e(t_s)\}_{s=k}^{k+n+1} \right| \leq \{c(t_s)\}_{s=k}^{k+n+1}, k = \overline{1, p-n-1}.$$

Описание эллипсоидов  $G_t$  и  $F_t$  вокруг найденных параллелепипедов  $G_t^*$  и  $F_t^*$  можно осуществить, пользуясь следующим правилом [4].

Для параллелепипеда  $\Pi(\mathbf{V}, \mathbf{d}) = \{\mathbf{x} \in R^{n+1} : \mathbf{V}_i \leq x_i \leq \mathbf{d}_i, i = \overline{0, m}\}$  оптимальный (минимально описанный) по критерию  $g_\alpha$  ( $\alpha$  – параметр минимизации) эллипсоид  $E(\mathbf{q}, L)$ , где  $L$  – диагональная матрица  $l_{ij} = l_i, i=j, i, j = \overline{0, n}$  определяют параметры

$$q = (\mathbf{V}, \mathbf{d}) / 2, l_i = \beta_i^{-\frac{2}{1+\alpha}} \left\{ \sum_{i=0}^n \beta_i^{\frac{2\alpha}{1+\alpha}} \right\}^{-1}, \quad (9)$$

$$\beta_i = (\mathbf{d}_i - \mathbf{V}_i) / 2, i = \overline{0, n}.$$

Для эллипсоида минимального объема, т.е. при  $\alpha = 0$ ,

$$l_i = (n+1)^{-1} \cdot \beta_i, i = \overline{0, n}.$$

Использование соотношений (9) позволяет описать область возможных значений ошибок  $\mathbf{h}_t^*$  и  $\mathbf{e}_t^*$  в виде (7) и построить рекуррентный минимаксный фильтр для нахождения результата прогноза состояния технической системы как оценки коэффициентов  $\{a_i\}_{i=0}^n$  (зависимость (1)). Такие оценки можно получить в виде линейной функции наблюдений  $\{z(t_k)\}_{k=1}^p, t_k \in T_p \subset T$ , т.е. как

$$\mathbf{a}^{mnT} = W^* \mathbf{Z}^* + \mathbf{U}^*,$$

где  $W^*$  – весовая матрица оптимального фильтра;  $\mathbf{U}^*$  – вектор настройки оптимального фильтра.

Поиск  $W^*$  и  $\mathbf{U}^*$ , определяющих структуру рассматриваемого алгоритма прогноза, составляет задачу

$$\gamma(W^* \mathbf{U}^*) = \arg \min_{V, U} \sup_{\xi_t^*, \mathbf{e}_t^*} \|\mathbf{a}(\mathbf{h}_t^*, \mathbf{e}_t^*) - (W \mathbf{Z}^* + \mathbf{U})\|. \quad (10)$$

Нахождение  $W^*$  и  $\mathbf{U}^*$  обеспечивает оптимальность  $\mathbf{a}^{mnT}$ , исходя из минимума максимально возможной ошибки оценивания  $\gamma(W^*, \mathbf{U}^*)$ , т.е. по минимаксному критерию.

Решением (10) являются рекуррентные соотношения, по форме аналогичные соотношениям, определяющим известный фильтр Калмана – Бьюси. Соответствующие аналогии можно обнаружить и при исследовании свойств получаемых оценок  $\mathbf{a}^{mnT}$ . В частности, такие оценки являются однозначными, несмещенными и удовлетворяющими условию сходимости [3]. Следовательно, алгоритм прогноза состояния, построенный на основе использования  $\mathbf{a}^{mnT}$ , также будет обладать всеми перечисленными свойствами.

Следует отметить важную с точки зрения практики особенность предоставленного алгоритма – его адаптивность. Данная особенность вытекает из рекуррентности алгоритма и позволяет применять при прогнозе без существенного снижения достоверности получаемых результатов модели  $y(t)$  вида (1) не выше 1-го порядка, т.е. линейные.

### Робастный прогноз состояния и надежности

Рассмотренные алгоритмы обеспечивают полное использование информации о состоянии контролируемого объекта, когда вероятностные свойства модельных ошибок и ошибок контроля не определены. На практике иногда приблизительно известны и некоторые стохастические характеристики  $\mathbf{e} = \{e(t_k)\}_{k=1}^p, t_k \in T_p \subset T$ , в частности, плотность распределения  $f_e(\mathbf{e})$ . Использование такой характеристики, хотя бы и заданной не совсем точно, дает возможность получить при прогнозе не только оценку самого контролируемого процесса  $y(t^*), t^* \in T \setminus T_p$ , но и найти его условную функцию распределения  $F(y(t^*)/\mathbf{z})$ . Знание  $F(y(t^*)/\mathbf{z})$  позволяет перейти от решения задачи прогнозирования состояния к задаче прогнозирования надежности, т.е. к задаче оценки вероятности безотказной

работы объекта при  $t^* \in T \setminus T_p$ . Алгоритм определения  $F(y(t^*)/\mathbf{z})$  с учетом приблизительно известной  $f_e(\mathbf{e})$  может быть представлен в следующем виде.

Пусть прогнозируемый процесс может быть аппроксимирован зависимостью (8). С учетом результатов контроля  $\mathbf{z}$  плотность совместного распределения случайных коэффициентов  $\mathbf{A} = \{A_i\}_{i=0}^n$  модели (8) можно записать как  $f_{Az}(\mathbf{a}/\mathbf{z})$ .

Согласно формуле Байеса

$$f_{Az}(\mathbf{a}/\mathbf{z}) = f_A(\mathbf{a})f_{zA}(\mathbf{z}/\mathbf{a}) / \int_{R^{n+1}} f_A(\mathbf{A})f_{zA}(\mathbf{z}/\mathbf{A})d\mathbf{A},$$

где  $f_A(\mathbf{a})$  – безусловная (априорная) плотность распределения вектора  $\mathbf{A}$ ;  $f_{zA}(\mathbf{z}/\mathbf{a})$  – плотность совместного распределения результатов контроля  $\mathbf{z}$  при условии  $\mathbf{A} = \mathbf{a}$ .

Нетрудно показать, что в рассматриваемом случае  $f_{zA}(\mathbf{z}/\mathbf{a}) = f_e(\mathbf{z}-\mathbf{y}(\mathbf{a}))$ . Плотность  $f_A(\mathbf{a})$ , согласно постановке задачи, неизвестна. Ввиду отсутствия оснований отдать заранее предпочтение каким-либо значениям случайных величин  $\mathbf{A}$  можно неизвестный априорный закон распределения заменить равномерным в любой области  $R^{n+1}$ . При этом

$$f_{Az}(\mathbf{a}/\mathbf{z}) = f_e(\mathbf{z}-\mathbf{y}(\mathbf{a}))I_A(\mathbf{a}) / \int_{\Omega_A} f_e(\mathbf{z}-\mathbf{y}(\mathbf{A}))d\mathbf{A}, \quad (11)$$

где  $\Omega_A$  – множество возможных значений коэффициентов  $\mathbf{A}$ ;

$$I_A(\mathbf{a}) = \begin{cases} 0, & \mathbf{A} \notin \Omega_A \\ 1, & \mathbf{A} \in \Omega_A. \end{cases}$$

Относительно ошибок контроля  $\mathbf{e}$  чаще всего принимается гипотеза нормальности, т.е. что

$$f_e(\mathbf{e}) = \pi^{-p/2} \exp\left(-\sum_{k=1}^p e_k^2\right).$$

Однако использование такой гипотезы сопряжено с риском чрезвычайно больших погрешностей в тех случаях, когда реальное распределение ошибок контроля имеет «более тяжелые хвосты» по сравнению с нормальным, т.е. когда истинная вероятность появления больших ошибок несколько превышает гипотетическую [5]. Для уменьшения погрешностей из-за «утяжеления хвостов» можно

аппроксимировать  $f_e(\mathbf{e})$  функцией  $\rho\left(\sum_{k=1}^p(e_k)\right) = (p-1)!\Psi_p\left(\sum_{k=1}^p(e_k)\right)2^{-p}\left(\sum_{k=1}^p(e_k)\right)^{1-p}$ , где  $\Psi_p(\cdot)$  – плотность распределения суммы модулей  $p$  независимых гауссовских величин с нулевым средним и дисперсией, равной 1/2. Такая аппроксимация приводит к более пессимистичным результатам при прогнозировании надежности, но позволяет избежать больших погрешностей в случае «тяжелых хвостов» плотности  $f_e(\mathbf{e})$ .

С учетом вида функции  $\rho\left(\sum_{k=1}^p|e_k|\right)$  можно записать

$$f_{Ac}(\mathbf{a}/\mathbf{z}) = \rho\left(\sum_{k=1}^p\left|z_k - \sum_{i=0}^n a_i u_i(t_k)\right|\right) I_A(\mathbf{a}) / \int_{\Omega_A} \rho\left(\sum_{k=1}^p\left|z_k - \sum_{i=0}^n A_i u_i(t_k)\right|\right) d\mathbf{A}.$$

Тогда устойчивая (робастная) по отношению к «тяжелым хвостам» функция распределения  $F(y/\mathbf{z})$  может быть представлена как

$$F_{Yc}(y/\mathbf{z}) = \int_{\Omega_y} f_{Ac}(\mathbf{A}/\mathbf{z})d\mathbf{A}. \quad (12)$$

Соотношение (12) может быть использовано для робастного прогнозирования надежности объекта следующим образом.

Пусть в качестве прогнозируемого показателя выбрана вероятность  $P_{\text{и}}$  того, что параметр  $Y(t)$  будет находиться в заданных пределах  $[y_{\text{н}}, y_{\text{в}}]$  для любого  $t \in (t_p, t^*]$  при условии, что результаты контроля приняли значения  $\mathbf{z}$ , т.е.

$$P_{\text{и}} = P\{y_{\text{н}} < Y(t) < y_{\text{в}} \quad \forall t \in (t_p, t^*] / \mathbf{z}\}.$$

Если  $\Omega_i$  – множество значений  $\mathbf{A}$ , удовлетворяющих условиям

$$y. < \sum_{i=0}^n A_i u_i(t^*) < y_{\text{во}} \quad \forall t \in (t_p, t^*], \text{ то}$$

$$P_{\text{и}} = \int_{\Omega_i} f_{Az}(\mathbf{A} / \mathbf{z}) d\mathbf{A}. \quad (13)$$

Когда распределение ошибок  $\epsilon$  можно считать лишь приблизительно нормальным,  $P_{\text{и}}$  не может быть вычислена с помощью зависимости (11), так как невозможно получить точное выражение для  $f_{Az}(\mathbf{a} / \mathbf{z})$ . Однако использование выражения (12) позволяет в данной ситуации найти робастную оценку вероятности  $P_{\text{и}}$  как

$$P_y = \int_{\Omega_i} f_{Ac}(\mathbf{A} / \mathbf{z}) d\mathbf{A}. \quad (14)$$

Соотношение (14) определяет пессимистическую оценку значения  $P_{\text{и}}$ , т.е.  $P_y \leq P_{\text{и}}$ .

### Формирование индивидуальной стратегии управления эксплуатацией

Результаты минимаксного индивидуального прогноза могут служить основой для формирования по принципу минимакса (максимина) индивидуальной стратегии управления эксплуатацией технического обслуживания объекта, т.е. для планирования обслуживания по состоянию. Такая стратегия (правило проведения мероприятий по техническому обслуживанию) должна гарантировать сохранение оптимального (в смысле некоторого минимаксного или максиминного критерия) качества функционирования объекта на множестве  $T$  в диапазоне условий, при которых  $\mathbf{y}(t)_- \leq \mathbf{y}(t) \leq \mathbf{y}(t)_+$ , где  $\mathbf{y}(t)_-, \mathbf{y}(t)_+$  – прогнозируемые пределы возможных изменений параметров технического объекта.

Рассмотрим постановку задачи.

Для количественной оценки качества функционирования объекта служат показатели (критерии) качества, под которым понимаются различные технико-экономические характеристики, такие как надежность, производительность, экономичность и т.п. В общем случае критерий качества представляет функционал вида  $W(Y, T)$ . Требования к качеству функционирования объекта на множестве  $T$  обычно заключаются в достижении экстремальных значений показателя  $W(Y, T)$ . При этом техническое обслуживание с учетом состояния объекта состоит в отслеживании  $\mathbf{y}(t)$  и проведении в определенные моменты  $t \in T$  его принудительных изменений, осуществляемых посредством определенных профилактических мероприятий. Основу профилактики составляет контроль и регулировка параметров объекта, замена блоков, узлов и элементов, параметры которых не регулируются и достигли некоторых критических значений. Если рассматривать эксплуатируемый объект как систему, находящуюся под воздействием возмущений, то указанные мероприятия есть совокупность управляющих воздействий, переводящих систему в режим, инвариантный к возмущениям. Цель управления здесь может быть описана как

$$W(\mathbf{y}, \mathbf{u}, t) = \text{extr},$$

где  $\mathbf{y}$  – вектор параметров технического объекта,  $\mathbf{u}$  – вектор управляющих воздействий,  $t \in T$ .

Введем понятие стратегии управления, под которой можно понимать функцию  $\mathbf{u}(t)$ , где  $\mathbf{u} \in U$ ,  $U$  – множество мероприятий по техническому обслуживанию объекта. Задача построения  $\mathbf{u}(t)$  в минимаксной (максиминной) постановке может быть записана в виде

$$g^* = \min_{\mathbf{u}(t) \in U \times T} \max_{\mathbf{y}(t) \in Y \times T} W(\mathbf{y}, \mathbf{u}, t) \text{ или } g^{**} = \max_{\mathbf{u}(t) \in U \times T} \min_{\mathbf{y}(t) \in Y \times T} W^*(\mathbf{y}, \mathbf{u}, t). \quad (15)$$

Очевидно, что функция, доставляющая минимум максимуму (или максимум минимуму) критерия  $W(\mathbf{y}, \mathbf{u}, t)$  (или  $W^*(\mathbf{y}, \mathbf{u}, t)$ ) является искомой минимаксной (или максиминной) индивидуальной стратегией технического обслуживания объекта.

Использование минимаксного (или максиминного) принципа обеспечивает нахождение равномерно наилучшего решения задачи, т.е. равномерно наилучшей стратегии технического обслуживания  $\mathbf{u}(t)$  (если такая имеется). Условием существования указанной стратегии является наличие седловой точки функционала  $W(\mathbf{y}, \mathbf{u}, t)$  по параметрам оптимизации.

Выбор критериев оптимальности для определения минимаксной (максиминной)  $\mathbf{u}(t)$  должен осуществляться исходя из требований, предъявляемых к качеству функционирования данного конкретного объекта. Эти требования, как правило, формируются с помощью определенных показателей, среди которых наиболее общими являются экономические характеристики функционирования объекта. В конечном счете мы всегда стремимся так эксплуатировать объект, чтобы суммарный эффект его использования во время эксплуатации был бы максимальным. По величине экономических показателей можно непосредственно судить об эффективности эксплуатации технического объекта, давать количественные оценки суммарного экономического эффекта. К таким показателям, в частности, относится показатель гарантированного уровня общих материальных потерь при эксплуатации объекта на множестве  $T$ :

$$S_g = \sup_{\mathbf{y}(t) \in Y \times T} \int_T H(\mathbf{y}(t)) dt + V_T,$$

где  $H(\mathbf{y}(t))$  – функция потерь, определяющих материальные потери, возникающие при отклонении состояния объекта от номинального;  $V_T$  – затраты на проведение мероприятий по техническому обслуживанию объекта во время эксплуатации.

Аддитивность критерия  $S_g$  открывает путь к решению задачи (15) на основе принципа оптимальности Беллмана [6]. При этом нахождение стратегии  $\mathbf{u}(t)$  можно рассматривать как многошаговый управляемый процесс принятия решений для синтеза оптимальной системы (управления), где  $S_g$  – финальная функция потерь (сумма потерь, связанных со всеми шагами принятия решений). За счет аддитивности  $S_g$  на основе принципа оптимальности Беллмана может быть достигнута глобальная оптимальность стратегии  $\mathbf{u}(t)$  пошаговой минимизацией критерия  $S_g$ . Соответствующие алгоритмы являются адаптивными, так как совместно с принятием основных решений оценивают неизвестную обстановку, чем улучшают процесс принятия решений. Они, как правило, достаточно просты и могут быть реализованы в рекуррентном виде.

Для составления рекуррентных уравнений решения задачи (15) на основе принципа оптимальности Беллмана необходимо построить пространство состояний. Иначе говоря, необходимо определить совокупность координат, содержащих применительно к задаче (15) все сведения об объекте на данном интервале времени вне зависимости от его прошлого поведения. При описании  $\mathbf{y}(t)$  зависимостью (1) искомую совокупность можно представить как набор  $(A^-, A^+, t, t_c)$ , где  $A^-$  и  $A^+$  – матрицы, элементы которых задают область вариаций значений коэффициентов  $a_{ij}$  в модели (1);  $t, t_c \in T, t \leq t_c$ . Данный набор является информационным пространством состояний для задачи (15).

Определение информационного пространства состояний объекта в виде  $(A^-, A^+, t, t_c)$  дает возможность построить алгоритм решения задачи (15) по критерию  $S_g$  на основе принципа оптимальности Беллмана.

Пусть функция  $S(A^-, A^+, t, t_c)$  характеризует предельные материальные потери, связанные с эксплуатацией объекта в состоянии  $(A^-, A^+, t, t_c)$  при проведении оптимальной стратегии  $\mathbf{u}(t)$ . Мероприятия по техническому обслуживанию состоят в контроле и регулировке  $\mathbf{y}(t)$  (несложно показать эквивалентность замен отдельных блоков, узлов и элементов объекта регулировке  $\mathbf{y}(t)$ ). При

этом регулировка заключается в простом смещении случайного процесса на известное значение  $r \in R$ , где  $R$  – множество значений регулировок.

Предельные материальные потери при эксплуатации объекта без обслуживания на интервале  $[t, t_c]$  для состояния  $(A^-, A^+, t, t_c)$  можно представить в виде

$$S_1(A^-, A^+, t, t_c) = \max_{A^-, A^+} \int_t^{t_c} H(y, x) dx. \quad (16)$$

Если в момент времени  $\tilde{t}, t \leq \tilde{t} \leq t_c$  произведено измерение  $y(t)$ , связанное с затратами  $\mu$ , и получено значение  $z(t) = y(t) + e(t)$  ( $e(t)$  – случайная ошибка измерения, стохастические свойства которой не определены, а задана лишь область ее возможных вариаций  $E$ ), то информационное состояние объекта будет  $(\tilde{A}^-, \tilde{A}^+, t, t_c)$ , где  $\tilde{A}^-, \tilde{A}^+$  – матрицы предельных значений коэффициентов  $a_{ij}$ , полученные по результатам проведенного измерения. При этом предельные материальные потери, связанные с эксплуатацией объекта, составят

$$S_2(A^-, A^+, t, t_c) = \{S_1(A^-, A^+, t, \tilde{t}) + \mu + S(\tilde{A}^-, \tilde{A}^+, \tilde{t}, t_c)\}. \quad (17)$$

Если в момент времени  $\tilde{t}, t \leq \tilde{t} \leq t_c$  осуществляется регулировка  $y(t)$  (изменение  $y(t)$  на  $r \in R$ ), затраты на проведение которой составляют  $\vartheta$ , то предельные материальные потери для информационного состояния можно описать как

$$S_3(A^-, A^+, t, t_c) = \{S_1(A^-, A^+, t, \tilde{t}) + \vartheta + S(A_r^-, A_r^+, \tilde{t}, t_c)\}, \quad (18)$$

где  $A_r^-, A_r^+$  – матрицы предельных значений коэффициентов  $a_{ij}$  с учетом изменения состояния объекта после регулировки.

Исходя из полученных зависимостей (16)–(18), можно сформировать на основе принципа оптимальности Беллмана рекуррентные уравнения для нахождения оптимальной стратегии  $u(t)$  по критерию  $S_g$ :

$$S(A^-, A^+, t, t_c) = \min_{i=1,2,3} (S_i), \quad (19)$$

$$S_1 = S(A^-, A^+, t, t_c), \quad (20)$$

$$S_2 = \min_{t \leq \tilde{t} \leq t_c} \{S_1(A^-, A^+, t, \tilde{t}) + \mu + \min_{A^-, A^+} S(\tilde{A}^-, \tilde{A}^+, \tilde{t}, t_c)\}, \quad (21)$$

$$S_3 = \min_{t \leq \tilde{t} \leq t_c} \{S_1(A^-, A^+, t, \tilde{t}) + \vartheta + \min_{r \in R} S(A_r^-, A_r^+, \tilde{t}, t_c)\}. \quad (22)$$

Значения  $i$ , на которых достигается минимум в (19) и значения  $\tilde{t}, r$ , на которых достигается общий минимум в (21) и (22), являются функциями  $(A^-, A^+, t, t_c)$  и описывают искомую оптимальную в смысле критерия  $S_g$  индивидуальную стратегию технического обслуживания  $u(t)$ .

В приведенных соотношениях фигурируют параметры  $A^-, A^+$ , получение которых связано с использованием определенной прогнозирующей процедуры. В качестве такой процедуры может служить один из алгоритмов минимаксного рекуррентного прогноза.

Решение уравнений (19)–(22) является задачей динамического программирования. При этом можно воспользоваться для поиска  $u(t)$  методом приближений в пространстве политик (стратегий) [6].

Использование метода приближений в пространстве стратегий дает возможность построить по уравнениям (19)–(22) таблицу оптимальных в смысле критерия мероприятий по техническому обслуживанию объекта, определяемых набором  $(A^-, A^+, t, t_c)$ . На основании такой таблицы в зависимости от результатов проведения профилактик можно сформировать оптимальную адаптивную стратегию  $u(t)$ , учитывающую индивидуальные особенности объекта.

Критерий  $S_g$  является наиболее общим, но не единственным используемым для формирования индивидуальной стратегии управления эксплуатацией. На практике достаточно часто при определе-

нии сроков технического обслуживания применяется как критерий оптимальности показатель вероятности безотказной работы. Такой показатель  $P_y(t^*)$  может быть рассчитан с помощью соотношения (14). При этом индивидуальная стратегия управления эксплуатации может состоять в проведении технического обслуживания в момент времени  $t^* \in T \setminus T_p$ , когда расчетное значение  $P_y(t^*)$  окажется меньше заданного  $P_3$ .

### Библиографический список

1. Абрамов, О. В. К проблеме предотвращения аварий технических объектов ответственного назначения / О. В. Абрамов // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 1. – С. 11–16.
2. Абрамов, О. В. Основные особенности и свойства метода гарантированного прогноза / О. В. Абрамов // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 1. – С. 3–10.
3. Фомин, В. Н. Рекуррентное оценивание и адаптивная фильтрация / В. Н. Фомин. – Москва : Наука, 1984. – 288 с.
4. Киселев, О. Н. Эллипсоидальное оценивание по обобщенному критерию / О. Н. Киселев, Б. Т. Поляк // Автоматика и телемеханика. – 1991. – № 9. – С. 133–145.
5. Абрамов, О. В. Анализ и прогнозирование техногенных рисков / О. В. Абрамов // Информатика и системы управления. – 2012. – № 3. – С. 97–105.
6. Беллман, Р. Прикладные задачи динамического программирования / Р. Беллман, С. Дрейфус. – Москва : Наука, 1965. – 458 с.

### References

1. Abramov O. V. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2013, no. 1, pp. 11–16. [In Russian]
2. Abramov O. V. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2017, no. 1, pp. 3–10. [In Russian]
3. Fomin V. N. *Rekurrentnoe otsenivanie i adaptivnaya fil'tratsiya* [Recurrent evaluation and adaptive filtering]. Moscow: Nauka, 1984, 288 p. [In Russian]
4. Kiselev O. N., Polyak B. T. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and remote control]. 1991, no. 9, pp. 133–145. [In Russian]
5. Abramov O. V. *Informatika i sistemy upravleniya* [Computer science and management systems]. 2012, no. 3, pp. 97–105. [In Russian]
6. Bellman R., Dreyfus S. *Prikladnye zadachi dinamicheskogo programmirovaniya* [Applied problems of dynamic programming]. Moscow: Nauka, 1965, 458 p. [In Russian]

#### Абрамов Олег Васильевич

доктор технических наук, профессор,  
заслуженный деятель науки РФ,  
заведующий лабораторией управления  
надежностью сложных систем,  
Институт автоматизации и процессов управления Даль-  
невосточного отделения  
Российской академии наук  
(Россия, г. Владивосток, ул. Радио, 5)  
E-mail: abramov@iacp.dvo.ru

#### Abramov Oleg Vasil'evich

doctor of technical sciences, professor,  
honored scientist of the Russian Federation,  
head of the management laboratory  
reliability of complex systems,  
Institute for Automation and Control processes,  
Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences  
(5 Radio street, Vladivostok, Russia)

#### Образец цитирования:

Абрамов, О. В. Прогнозирование состояния и планирование эксплуатации систем ответственного назначения / О. В. Абрамов // Надежность и качество сложных систем. – 2020. – № 3 (31). – С. 5–14. – DOI 10.21685/2307-4205-2020-3-1.

**А. М. Самокутяев, В. В. Шиндин****ОБ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ  
ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ****A. M. Samokutyaev, V. V. Shindin****ABOUT THE ROAD SAFETY INFORMATION SYSTEM  
IN THE RUSSIAN FEDERATION**

**Аннотация.** В современном мире невозможно представить свою повседневную жизнедеятельность без информационных технологий. История становления распространяется на весь прошлый век, а то и раньше. Прорывной этап в применении информационных технологий произошел в конце ушедшего столетия. В настоящее время мы уже не видим современную жизнь без повсеместных информационных гаджетов, основными уникальными характеристиками стали глобальность, доступность и работа в режиме реального времени, так называемый «онлайн». Масштабность применения информационных технологий продемонстрировали свою как повседневную социальную эффективность, так и организацию жизнедеятельности в условиях кризисных ситуаций, в том числе последней чрезвычайной ситуации бактериологического характера, пандемии международного характера. Особый современный параметр «многосферность» – задействование для решения задач социально-экономического и иного характера, компьютеризированных информационных систем (аппаратно-программных комплексов), относящихся к организации управления, обеспечивающих информационных технологий, технических комплексов, находящихся в различных (удаленных) территориях, акваториях, воздушно-космическом пространстве. В работе сделана попытка отражения современного уровня развития и применения информационных технологий в целях обеспечения безопасности дорожного движения на примере совершенствования информационного обеспечения подразделений Госавтоинспекции РФ.

**Ключевые слова:** безопасность, транспорт, дорожное движение, информационные технологии, аппаратно-программный комплекс, управление.

**Abstract.** In the modern world, it is impossible to imagine your daily life without information technology. The history of formation extends over the entire past century, and even earlier. A breakthrough stage in the use of information technology took place at the end of the past century. Currently, we no longer see modern life without ubiquitous information gadgets, the main unique characteristics are globality, accessibility and work in real time, the so-called "online". The scale of the use of information technologies have demonstrated their both everyday social efficiency and the organization of life in crisis situations, incl. the latest bacteriological emergency, an international pandemic. A special modern parameter "multi-sphere" is the use of computerized information systems (hardware-software complexes) related to the organization of management, providing information technologies, technical complexes located in various (remote) territories, water areas, to solve problems of a socio-economic and other nature, aerospace.

An attempt is made in the work to reflect the current level of development and application of information technologies in order to ensure road safety by the example of improving the information support of the RF State Traffic Inspectorate units.

**Keywords:** security, transport, traffic, information technology, hardware and software complex, management.

Транспорт всегда нуждался в качественной информации в силу собственной высокой мобильности.

В прошлом веке в интересах организации движения автомобильного транспорта стали повсеместно активно использоваться возможности космической группировки. Для решения проблем организации связи, пространственного позиционирования в интересах организации дорожного движения ратифицировались международные договора, правовые и нормативные акты, декларировались

целевые программы, реализовывались социально-экономические программы, направленные на повышение качества дорожного движения, прежде всего, направленного на безопасность и комфортность эксплуатации автомобильного и иного транспорта.

В конце XX в. регистрационные действия с транспортными средствами, выдача и замена водительских удостоверений на право управления транспортными средствами проводились регистрационно-экзаменационными подразделениями Госавтоинспекции по месту регистрации заявителя путем отражения совершенных операций в реестрах регистрационных действий и выдачи водительских удостоверений. Вся фиксация производилась в рукописном виде на бумажном носителе. Данные сведения помещались в архив и составляли ручную картотеку. Заявителю для внесения изменений в регистрационные действия с транспортным средством: снятие автомобиля с регистрационного учета, замены водительского удостоверения, – приходилось обращаться в регистрационно-экзаменационное подразделение по месту ранее совершенного регистрационного действия, что приводило к дополнительным временным затратам при поиске информации в ручной картотеке.

В целях совершенствования организации учета автомототранспортных средств, государственных регистрационных знаков, водительских и регистрационных документов был издан приказ МВД России № 125 от 31.03.1995 «Об учете автомототранспортных средств и специальной продукции Госавтоинспекции» (в настоящее время утратил силу).

В соответствии с данным приказом была утверждена и введена в действие с 1 мая 1995 г. Инструкция автомототранспортных средств и специальной продукции Госавтоинспекции. До 1 апреля 1996 г. был разработан и введен в эксплуатацию программно-технический комплекс федеральной автоматизированной информационно-поисковой системы учета автомототранспортных средств (АИПС «Автомобиль»).

Данный учет предназначался для сбора, хранения, обработки и выдачи сведений об автомототранспортных средствах и прицепах к ним, собственниках транспортных средств или их законных представителях, изготовленных бланках регистрационных и водительских документов и государственных регистрационных знаках транспортных средств, о похищенной (утраченной) спецпродукции, а также о похищенных (утраченных) регистрационных и водительских документах и государственных регистрационных знаках.

Учет осуществлялся в целях обеспечения полноты информации о зарегистрированных транспортных средствах и спецпродукции, выполнения розыскных и мобилизационных мероприятий, осуществления надзора за конструкцией транспортных средств при их регистрации и технических осмотрах.

При совершении регистрационных действий порядок формирования учета транспортных средств подразумевал два способа: ручной и автоматизированный. При ручном способе учета составлялось три экземпляра карточек. Один экземпляр карточки оставался в картотеке подразделения Госавтоинспекции, зарегистрировавшего транспортное средство, второй экземпляр направлялся в Госавтоинспекцию горрайоргана внутренних дел по месту жительства физического лица, расположения юридического лица, месту жительства иных лиц или бронирования жилплощади в пределах территории, на которую распространялась деятельность подразделения Госавтоинспекции, зарегистрировавшего транспортное средство. Третий экземпляр направлялся в ГАИ МВД, ГУВД, УВД, где формировалась региональная картотека, сгруппированная по регистрационным знакам транспортных средств. Из первых и вторых экземпляров карточек учета транспортных средств формировались картотеки в подразделениях Госавтоинспекции по месту регистрации транспортных средств – по сериям регистрационных знаков, в подразделениях Госавтоинспекции горрайорганов внутренних дел – по предприятиям, учреждениям, организациям и по фамилии физических лиц в алфавитном порядке. При автоматизированном процессе формирования картотек информация, указанная в карточке учета транспортных средств, направлялась по каналам связи в те же подразделения, что и при ручном способе учета, где после предварительного контроля и обработки заносилась в базы данных региональной автоматизированной системы учета автомототранспортных средств (АИПС «Автомобиль»). Из региональной базы данных информация ежедневно передавалась в установленном ГУГАИ МВД России формате по каналам связи в соответствующий межрегиональный отдел информационного обеспечения оперативно-поисковой системы по розыску автомототранспортных средств. Межрегиональные отделы обеспечивали между собой информационное взаимодействие в запросном режиме. Запросы оформлялись в виде текстовой строки и направлялись по телеграф-

ным и телефонным коммутируемым или выделенным каналам связи в региональный центр автоматизированной информационно-поисковой системы розыска автотранспортных средств по территориальности. Региональные центры при необходимости направляли запросы в межрегиональные, а межрегиональные – в федеральный центр. Запросы исполнялись в тот же день. Ответ помещался в соответствующий почтовый каталог и мог быть получен абонентом по каналам связи. Данный способ обмена информацией подразумевал определенный интервал времени между направлением запроса и получением ответа, что в конечном счете приводило к длительному совершению регистрационного действия, а также излишнему документообороту.

Следующим шагом по совершенствованию использования централизованных оперативно-справочных, розыскных и криминалистических учетов подразделениями Госавтоинспекции было издание приказа МВД России № 356 от 18.05.1999 «О мерах по совершенствованию использования централизованных оперативно-справочных, розыскных и криминалистических учетов подразделениями Государственной инспекции безопасности дорожного движения Министерства внутренних дел Российской Федерации». Данный приказ преобразовал информационно-поисковую систему розыска автотранспортных средств межрегиональной специальной заградительной системы контрольных постов милиции в систему информационного обеспечения Государственной инспекции безопасности дорожного движения Министерства внутренних дел Российской Федерации, утверждал Временное положение о системе информационного обеспечения подразделений Государственной инспекции безопасности дорожного движения Министерства внутренних дел Российской Федерации (утратило силу в связи с изданием приказа МВД России № 1144 от 03.12.2007), а также типовую структуру региональных подразделений информационного обеспечения Государственной инспекции безопасности дорожного движения МВД, ГУВД, УВД субъектов Российской Федерации.

Основные функции системы информационного обеспечения Государственной инспекции безопасности дорожного движения Министерства внутренних дел Российской Федерации:

1. Формирование, ведение и использование централизованных оперативно-справочных, розыскных и криминалистических учетов: разыскиваемых автотранспортных средств (автоматизированная информационно-поисковая система «Розыск»); зарегистрированных автотранспортных средств (АИПС «Автомобиль»); распределенной, утраченной, похищенной, выбракованной спецпродукции Государственной инспекции безопасности дорожного движения Министерства внутренних дел Российской Федерации (АИПС «Документ»); выданных водительских удостоверений (АИПС «Водитель»).

2. Ведение и использование централизованных учетов ГИЦ МВД России, ИЦ при МВД, ГУВД, УВД субъектов Российской Федерации: разыскиваемых автотранспортных средств (АИПС «Автопоиск»); лиц, объявленных в федеральный розыск (АИПС «ФР – Оповещение»); утраченного и выявленного огнестрельного оружия (АИПС «Оружие»).

Одной из основных задач региональных подразделений информационного обеспечения Госавтоинспекции субъектов Российской Федерации являлось обеспечение подразделений ГИБДД МВД России информацией о зарегистрированных, разыскиваемых транспортных средствах, распределенной, утраченной, похищенной, выбракованной спецпродукции ГИБДД МВД России, выданных водительских удостоверениях, лицах, объявленных в федеральный розыск, утраченном и выявленном огнестрельном оружии, прошедших таможенное оформление транспортных средствах, получении сведений. В связи с созданием данных подразделений получение сведений стало носить оперативный характер, временные промежутки минимизировались.

В целях повышения эффективности информационного обеспечения подразделений Госавтоинспекции и иных подразделений органов внутренних дел Российской Федерации, а также их взаимодействия с соответствующими органами государственной власти Российской Федерации и организациями был подписан приказ МВД России № 1144 от 03.12.2007 «О системе информационного обеспечения подразделений Госавтоинспекции», в котором утверждалось положение о системе информационного обеспечения подразделений Госавтоинспекции, наставление по организации формирования и ведения специализированных учетов федеральной специализированной территориально распределенной информационной системы Госавтоинспекции, а также требования к информационному взаимодействию в федеральной специализированной территориально распределенной информационной системе Госавтоинспекции.

С 1 августа 2016 г. введено в эксплуатацию специальное программное обеспечение федеральной информационной системы Госавтоинспекции на базе инфраструктуры единой системы информационно-аналитического обеспечения деятельности МВД России. Целью данной системы является организация единого централизованного информационного пространства Госавтоинспекции, обеспечение эффективной информационной поддержки деятельности подразделений МВД России и территориальных органов МВД России на региональном и районном уровнях, а также информационного обмена с заинтересованными органами в целях предоставления государственных и муниципальных услуг и исполнения государственных и муниципальных функций. Данное программное обеспечение является единым на всей территории Российской Федерации и позволяет получать информацию в режиме реального времени. В состав системы входят подсистемы:

– «Транспортные средства» – предназначена для автоматизации проведения регистрационных действий с транспортными средствами в целях обеспечения предоставления подразделениями Госавтоинспекции государственной услуги по регистрации автомототранспортных средств и прицепов к ним, включая межведомственное информационное взаимодействие в ходе предоставления государственной услуги;

– «Водительские удостоверения» – предназначена для автоматизации функций Госавтоинспекции по учету сведений о выданных российских национальных и международных водительских удостоверениях, лицах, получивших водительское удостоверение, а также для обеспечения предоставления подразделениями Госавтоинспекции государственной услуги по проведению экзаменов на право управления транспортными средствами и выдаче водительских удостоверений, включая межведомственное информационное взаимодействие в ходе предоставления государственной услуги;

– «Административные правонарушения» – предназначена для учета административных правонарушений, по которым сотрудники Госавтоинспекции уполномочены составлять протоколы об административном правонарушении, и автоматизации процесса производства по ним, а также информационного обеспечения оказания подразделениями Госавтоинспекции государственной услуги по предоставлению сведений об административных правонарушениях в области дорожного движения;

– «Специальная продукция» – предназначена для учета распределенной в подразделения Госавтоинспекции, утраченной, похищенной, уничтоженной специальной продукции, необходимой для допуска транспортных средств и водителей к участию в дорожном движении;

– «Получение и предоставление сведений» – предназначена для обеспечения взаимодействия ФИС ГИБДД-М с прикладными сервисами ИСОД МВД России, информационными системами МВД России, а также с информационными ресурсами федеральных органов исполнительной власти, органов исполнительной власти субъектов Российской Федерации, органов местного самоуправления, предоставляющих государственные или муниципальные услуги и исполняющих государственные или муниципальные функции, а также организаций, в которых размещается государственное задание (заказ) или муниципальное задание (заказ) на предоставление таких услуг.

С внедрением специального программного обеспечения федеральной информационной системы Госавтоинспекции повысилось качество предоставления государственных услуг по линии обеспечения безопасности дорожного движения.

### Библиографический список

1. О полиции : федер. закон № 3–ФЗ от 7 февраля 2011 г.
2. Федеральная космическая программа России на 2016–2025 годы : утв. постановлением Правительства РФ № 230 от 23 марта 2016 г.
3. Северцев, Н. А. Моделирование безопасности функционирования динамических систем / Н. А. Северцев, А. В. Бецков. – Москва : ТЭИС, 2015. – 327 с.
4. Бецков, А. В. Теоретические и организационные основы формирования аэромобильных комплексов МВД России. Академия управления МВД России / А. В. Бецков. – Москва : МГУ им. М. В. Ломоносова, 2009. – 198 с.
5. Михайлов, В. С. Интегральные оценки в теории надежности. Введение и основные результаты / В. С. Михайлов, Н. К. Юрков. – Пенза : Техносфера, 2020. – 152 с.

## References

1. *O politzii: feder. zakon № 3–FZ ot 7 fevralya 2011 g.* [About the police: feder. law no. 3-FZ of February 7, 2011]. [In Russian]
2. *Federal'naya kosmicheskaya programma Rossii na 2016–2025 gody: utv. postanovleniem Pravitel'stva RF № 230 ot 23 marta 2016 g.* [Federal space program of Russia for 2016–2025: approved by decree of the Government of the Russian Federation No. 230 of March 23, 2016]. [In Russian]
3. Severtsev N. A., Betskov A. V. *Modelirovanie bezopasnosti funktsionirovaniya dinamicheskikh sistem* [Modeling the safety of dynamic systems]. Moscow: TEIS, 2015, 327 p. [In Russian]
4. Betskov A. V. *Teoreticheskie i organizatsionnye osnovy formirovaniya aeromobil'nykh kompleksov MVD Rossii. Akademiya upravleniya MVD Rossii* [Theoretical and organizational bases of formation of airmobile complexes of the Ministry of internal Affairs of Russia. Academy of management of the Ministry of internal Affairs of Russia]. Moscow: MGU im. M. V. Lomonosova, 2009, 198 p. [In Russian]
5. Mikhaylov V. S., Yurkov N. K. *Integral'nye otsenki v teorii nadezhnosti. Vvedenie i osnovnye rezul'taty* [Integral estimates in reliability theory. Introduction and main results]. Penza: Tekhnosfera, 2020, 152 p. [In Russian]

### Самокутяев Александр Михайлович

Герой России, летчик-космонавт,  
заместитель командира отряда космонавтов  
ФГБУ НИИ ЦПК им. Ю. А. Гагарина  
(Россия, Московская область, Щелковский район,  
Звездный городок)  
E-mail: samo@gctc.ru

### Samokutyaev Alexander Mikhailovich

Hero of Russia, pilot-cosmonaut,  
Deputy Commander of the Cosmonaut Detachment  
of the Gagarin Research Institute of the CTC  
(Star City, Shchelkovsky district,  
Moscow region, Russia)

### Шиндин Виктор Владимирович

слушатель,  
Академия управления МВД России  
(Россия, г. Москва,  
ул. Зои и Александра Космодемьянских, 8)  
E-mail: vshindin@mvd.ru

### Shindin Victor Vladimirovich

student,  
Academy of Management of the Ministry  
of Internal Affairs of Russia  
(8 Zoe and Alexandra Kosmodemyanskikh street,  
Moscow, Russia)

### Образец цитирования:

Самокутяев, А. М. Об информационной системе обеспечения безопасности дорожного движения в Российской Федерации / А. М. Самокутяев, В. В. Шиндин // Надежность и качество сложных систем. – 2020. – № 3 (31). – С. 15–19. – DOI 10.21685/2307-4205-2020-3-2.

**А. В. Подкопаев, И. А. Подкопаев****ЦЕНТРАЛИЗОВАННЫЙ АДАПТИВНЫЙ АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ  
БЕЗОТКАЗНОСТИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ  
СИСТЕМ РАЗЛИЧНОЙ ЭНТРОПИИ****A. V. Podkopaev, I. A. Podkopaev****CENTRALIZED ADAPTIVE ALGORITHM FOR EVALUATING  
THE RELIABILITY OF COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS  
OF VARIOUS ENTROPY**

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Современные и перспективные сложные технические системы (в дальнейшем для краткости по тексту – система) характеризуются усложнением структур соединения и повышением требований к надежности элементов. Учитывая приоритет важнейшего этапа эксплуатации систем – применения по назначению, предназначим методологию оценки безотказности как свойства, отражающего основное содержание надежности. Для большинства элементов табуляция значений статистических показателей безотказности в процессе обработки данных из сферы эксплуатации систем не представляет значительных вычислительных трудностей. Однако при анализе безотказности систем, данные о наработке до отказа элементов которых отсутствуют (например, для элементов, сравнительно недавно принятых в эксплуатацию или при отсутствии информации об условиях функционирования элемента, вновь введенного в структуру разработанной или модернизированной системы), прямая алгоритмизация инженерных методик, основанных на сборе статистической информации, не представляется возможной. Целью работы установлена разработка взаимосвязанной совокупности математических и логических блок-схем получения и применения фактических знаний в программно-математическом обеспечении процедуры расчета безотказности систем неодинаковой степени статистической определенности. *Материалы и методы.* Перспективным направлением в подобных исследованиях является дифференцированная селекция апробированных методов физической надежности с выбором соответствующего математического и алгоритмического аппарата непосредственного вероятностного моделирования систем. *Результаты.* Предложена блок-схема и рассмотрен вариант практического приложения синтезированного алгоритма имитационной оценки безотказности систем различной энтропии (далее по тексту – алгоритм). *Выводы.* С применением разрабо-

**Abstract.** *Background.* Modern and promising complex technical systems (hereinafter referred to as the system for brevity) are characterized by a complication of connection structures and increased requirements for the reliability of elements. Given the priority of the most important stage of systems operation - the intended use, we will devise a methodology for assessing reliability, as a property that reflects the main content of reliability. For most elements, the tabulation of the values of the statistical reliability indicators in the process of processing data from the field of operation of the systems does not present significant computational difficulties. However, when analyzing the failure-free operation of systems for which the operating time to failure of the elements is not available (for example, for elements recently commissioned or in the absence of information on the functioning conditions of the element again brought into the structure of the developed or modernized system), direct algorithmization of engineering methods based on the collection of statistical information is not possible. The aim of the work is the development of an interconnected set of mathematical and logical flowcharts for obtaining and applying factual knowledge in the mathematical software of the procedure for calculating the reliability of systems of varying degrees of statistical certainty. *Materials and methods.* A promising direction in such studies is the differentiated selection of proven methods of physical reliability with the choice of the appropriate mathematical and algorithmic apparatus for direct probabilistic modeling of systems. *Results.* A block diagram is proposed and a practical application of a synthesized algorithm for simulating the failure-free assessment of the reliability of systems of various entropy is considered (hereinafter, the algorithm). *Summary.* Using the developed algorithm, there is no need for decomposition of systems, and the potential of multiple repetitions of the results of a random process of changing the technical states of elements and systems determines the possibility of obtaining large samples with high accuracy of program compilation.

танного алгоритма отсутствует необходимость в декомпозиции систем, а потенциал многократных повторений результатов случайного процесса смены технических состояний элементов и систем предопределяет возможность получения больших выборок с высокой точностью программной компиляции.

**Ключевые слова:** статистически определенный и статистически неопределенный элемент, прямое имитационное моделирование, показатели безотказности элементов и систем, методы надежности, экспоненциальное распределение, фрейм, экспертная система.

**Keywords:** statistically determined and statistically indefinite element, direct probabilistic modeling, reliability indicators of elements and systems, reliability methods, exponential distribution, frame, expert system.

## Введение

В условиях непрерывного финансирования программ совершенствования вооружения и военной (специальной) техники особенно остро встает вопрос поиска наиболее эффективных путей повышения, обеспечения и поддержания безотказности систем.

Применительно к электромеханическим системам под безотказностью будем понимать способность системы выполнять функции в переключательном, усилительном, выпрямительном и других режимах, а также, что весьма важно, – в различных конструктивных решениях и условиях эксплуатации.

Вместе с тем сложность систем достигла в настоящее время такого уровня, что в большинстве случаев отдельный человек-эксперт или группа экспертов не в состоянии полно и точно обрабатывать объемы информации о неоднородных процессах, происходящих при функционировании, повреждениях и отказах систем. Более того, перспективные системы достаточно уникальны и (или) малосерийны, а составляющие их элементы в своей основе миниатюрны или дороги. Поэтому дальнейшее развитие теории и практики надежности представляется как формирование базы, ориентированной на частичную или полную передачу аналитических функций эксперта от человека-оператора машине.

## Основная часть

Алгоритмы вероятностного моделирования задач исследования безотказности систем, информация о моментах времени отказов которых статистически однозначно определена, разработаны весьма детально и рассмотрены в специальной литературе, например [1, 2].

С учетом актуализации стратегии технической эксплуатации по состоянию и смешанной стратегии технической эксплуатации, процессов планомерного продления ресурсов систем [3] в качестве наиболее естественной, практически осуществимой формой, удовлетворяющей современным требованиям, обусловим целесообразность дальнейшего совершенствования процедур надежности разработкой алгоритма, обладающего свойствами централизованности и адаптации. Блок «множество времен наработки до отказа» такого алгоритма рассматривается как центральный, обеспечивающий функции регулятора при расчете показателей безотказности статистически определенных и статистически неопределенных элементов, исходная информация об отказах которых различна. Свойство адаптации отражает то обстоятельство, что формирование ветвей подобного алгоритма осуществляется, исходя из дефиниции структур систем, а связи между ветвями при применении алгоритма по назначению реализуются на основе функционального сочетания всех алгоритмических блоков.

При достижении цели работы задействованы инструменты прямого имитационного моделирования, при которых алгоритм воспроизводит, имитирует реальные действия человека-оператора, являющиеся случайно зависимыми от вида априорной информации и структуры системы.

Синтезированный алгоритм представлен в виде блок-схемы операторов, отдельные из которых отображают достаточно крупную группу элементарных арифметических и логических операций, как показано на рис. 1.

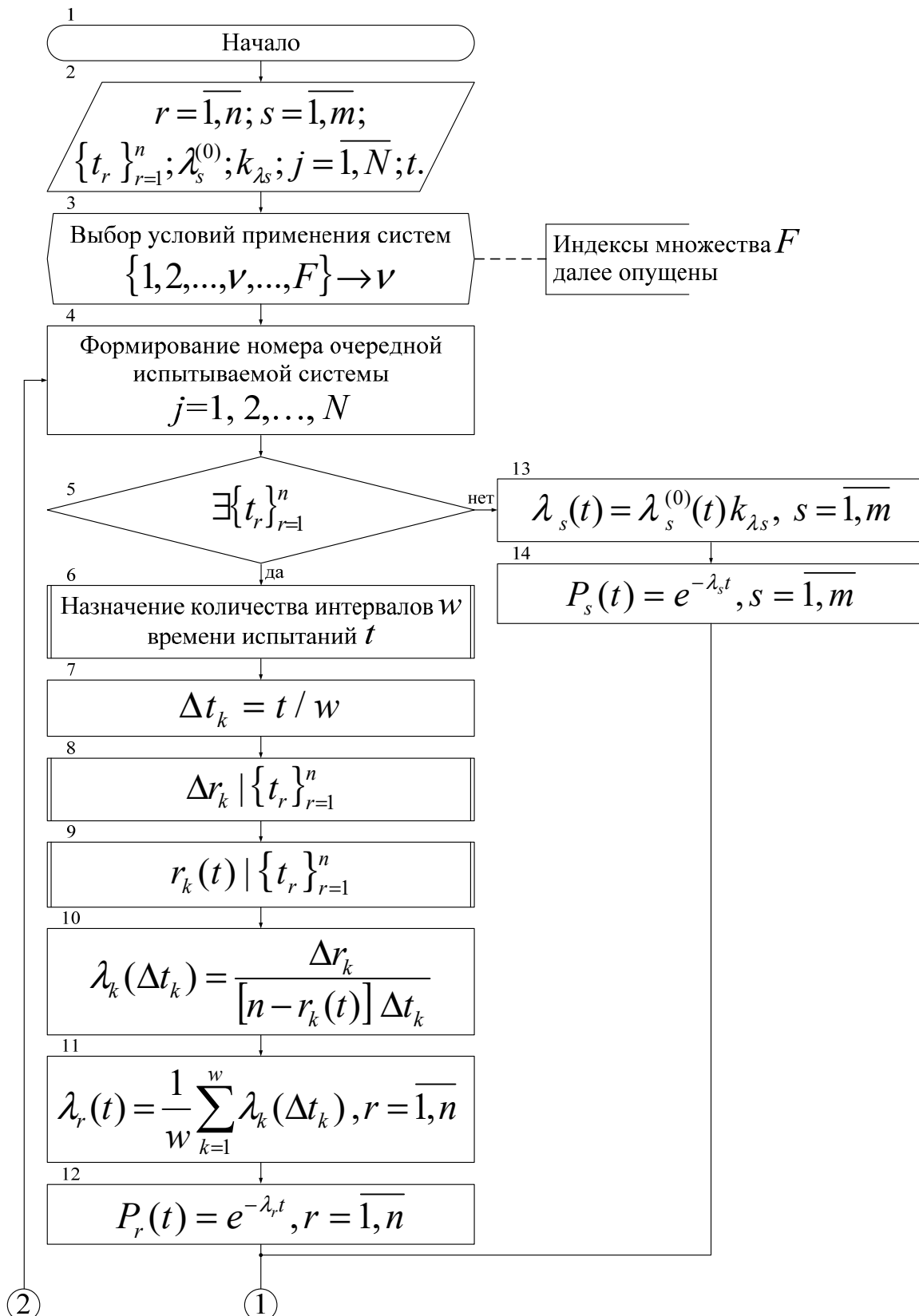


Рис. 1. Блок-схема централизованного адаптивного алгоритма оценки безотказности сложных технических систем различной энтропии (начало)

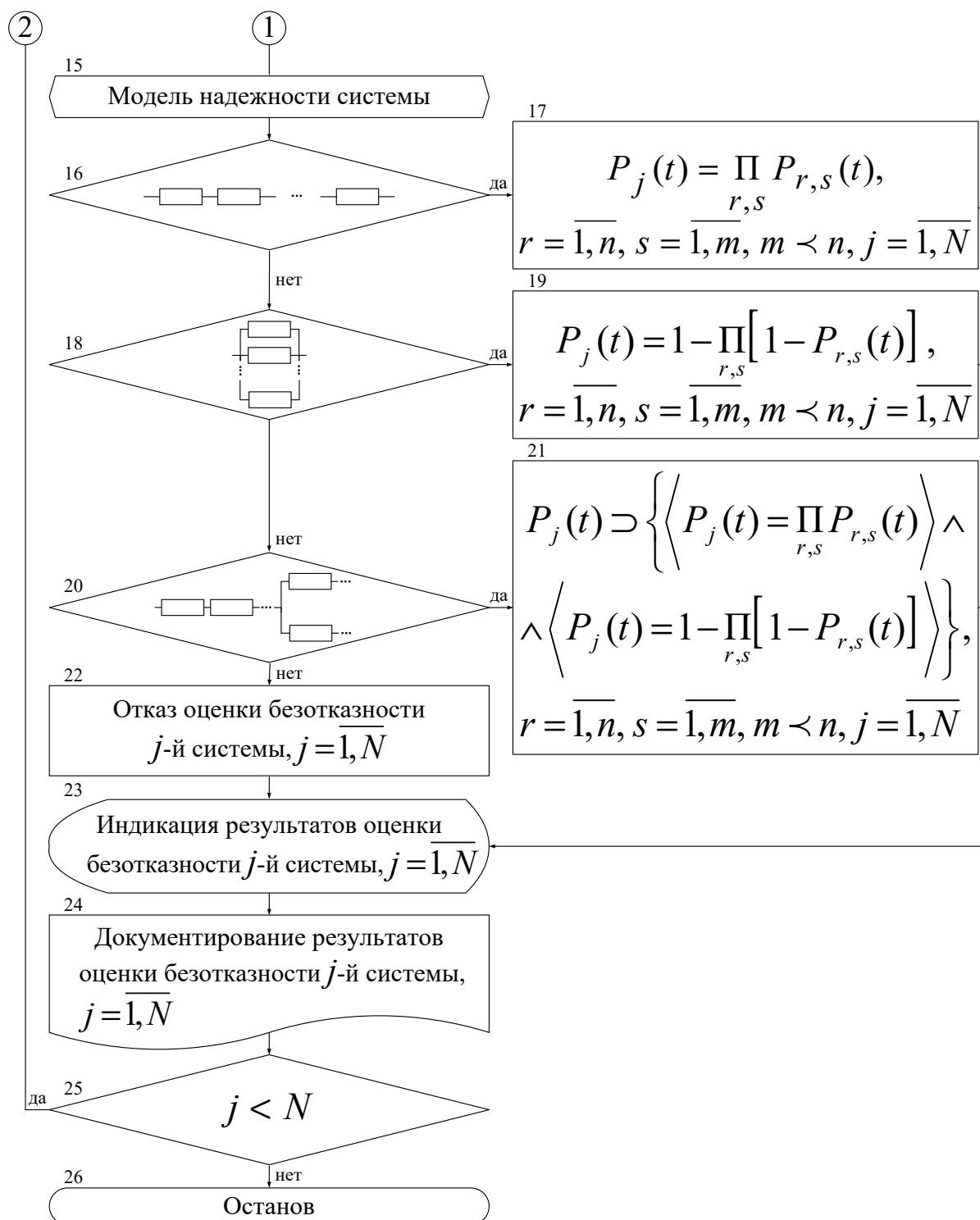


Рис. 1. Блок-схема централизованного адаптивного алгоритма оценки безотказности сложных технических систем различной энтропии (окончание)

Разработанный алгоритм функционирует на основе исходных данных, систематизируемых в операторе 2:

- заданного количества статистически определенных  $r$ -х элементов  $r = \overline{1, n}$ ;
- заданного количества статистически неопределенных  $s$ -х элементов  $s = \overline{1, m}$ ;
- множества времен наработки до отказа статистически определенных  $r$ -х элементов  $\{t_r\}_{r=1}^n$ ;

– интенсивностей отказов для идеальных условий функционирования (нормальные: атмосферное давление, влажность, температура; отсутствие вибраций и ударных сотрясений) статистически неопределенных  $s$ -х элементов  $\lambda_s^{(0)}(t)$ ;

– значений поправочного коэффициента  $k_{\lambda_s}$ , показывающих, во сколько раз значения интенсивностей отказов статистически неопределенных  $s$ -х элементов, функционирующих в заданных условиях применения, больше интенсивностей отказов элементов данного типа, функционирующих в идеальных условиях;

– количества  $j$ -х исследуемых систем  $j = \overline{1, N}$ .

Время испытаний элементов  $t$  задается исходя из целей эксперимента.

По завершении процесса ввода исходных данных с применением оператора 3 осуществляется конкретизация условий применения систем  $\{1, 2, \dots, v, \dots, F\} \rightarrow v$  (например, выбираются условия применения систем в составе бортового оборудования летательных аппаратов).

После ввода исходных данных и выбора условий применения систем оператор 4 формирует очередной номер  $j = 1, 2, \dots, N$  исследуемой системы.

Далее функционирует группа операторов 5 – 14, выполняющих выбор и воспроизведение соответствующего метода расчета безотказности элементов различной степени неопределенности на основе назначенных исходных данных. Логический оператор 5 обеспечивает разветвление общей процедуры расчета безотказности элементов в зависимости от наличия или отсутствия статистических сведений об отказах элементов.

При существовании множества времен наработки до отказа  $\{t_r\}_{r=1}^n$  статистически определенных  $r$ -х элементов оператор 5 подключает операторы 6–12, реализующие инженерную методику расчета безотказности элементов [4, 5].

Рассматриваемое время испытаний  $t$  разбивается на малые интервалы длительностью  $\Delta t_k$ , где  $k = \overline{1, w}$  – номер интервала времени испытаний  $t$ . Схема назначения количества интервалов  $w$  времени испытаний  $t$ , определяемая в операторе 6, обуславливается продолжительностью эксперимента и точностью расчетов. В основном эта задача разрешима эвристическими методами, в которых не последнюю роль играют интуиция специалистов, знание ими прикладных вопросов теории статистических решений и умения в корректном применении формулировок надежности. Решение подобных вопросов по-прежнему остается прерогативой человека-оператора.

Длительность малых интервалов  $\Delta t_k$  времени испытаний  $t$  вычисляется простой арифметической операцией оператора 7.

Для выбора количества статистически определенных  $r$ -х элементов, отказавших на  $k$ -м интервале наработки –  $\Delta r_k$ , и количества статистически определенных  $r$ -х, отказавших к началу  $k$ -го интервала наработки –  $r_k(t)$ , предусмотрены, соответственно, операторы 8 и 9, устанавливающие условную зависимость алгоритмических действий от множества времен наработки до отказа испытываемых элементов.

Таким образом, функционирование группы операторов 6–9 выполняется в условиях активного эксперимента, что диктует необходимость обобщения результатов для конкретных условий расчета. Сформулируем эти результаты, представив в операторе 10 математическую форму оценки интенсивности отказов совокупности статистически определенных  $r$ -х элементов для каждого  $k$ -го интервала времени испытаний  $t$  как отношение количества статистически определенных  $r$ -х элементов, отказавших на  $k$ -м интервале наработки –  $\Delta r_k$  к количеству статистически определенных  $r$ -х элементов, работоспособных на начало  $k$ -го интервала наработки –  $[n - r_k(t)]$ .

С учетом классических допущений о возможности применения экспоненциального распределения на каждом участке так называемой «лямбда-характеристики» [6–8] интенсивность отказов  $\lambda_r(t)$  и вероятность безотказной работы  $P_r(t)$  в течение времени испытаний  $t$  всех статистически определенных  $r$ -х элементов вычисляются согласно зависимостям статистических решений, представленным в операторах 11 и 12 соответственно.

В случае отсутствия статистической информации об отказах элементов оператором 5 передается управление на операторы 13 и 14, содержащие аппарат коэффициентного метода расчета статистически неопределенных  $s$ -х элементов [4, 8]. Применяемый в разработанном алгоритме коэффициентный метод физической надежности предопределяет возможность оценки показателей

безотказности элементов, неполнота сведений о которых не позволяет использовать методы непосредственного аналитического моделирования.

Интенсивность отказов статистически неопределенных  $s$ -х элементов  $\lambda_s(t)$  определяется в операторе 13 произведением интенсивностей отказов для идеальных условий функционирования статистически неопределенных  $s$ -х элементов  $\lambda_s^{(0)}(t)$  на справочные значения поправочного коэффициента  $k_{\lambda_s}$ , обсужденного выше.

В операторе 14 определяются вероятности безотказной работы статистически неопределенных  $s$ -х элементов, соответствующие значениям интенсивностей отказов, вычисленных в операторе 13. Для этого также используется формула экспоненциального распределения.

Существенно важным аспектом в практических приложениях методологии надежности является определение возможности распространения результатов обработки полученной количественной информации о безотказности элементов различной энтропии на единство подходов в типовых решениях безотказности систем в целом.

Оператор 15 является типовым для идентификации последовательной, параллельной моделей надежности системы или смешанной структуры соединения элементов и предназначен для проведения анализа взаимодействия элементов между собой в пространственно-временной организации системы, определяющей виды, характер связей и отношений между элементами. Для структуризации системы могут быть использованы фреймы – конструкции описания некоторой системы, обладающей теми или иными свойствами и хранящие всю информацию о свойствах и отношениях системы [9]. Здесь же заметим, что такой анализ является промежуточным этапом решения задачи оценки безотказности систем на вычислительной машине.

После анализа структуры системы в процесс функционирования разработанного алгоритма включаются операторы 16–22, предназначенные для воспроизведения метода и вычисления показателей безотказности системы, установленной оператором 15.

При последовательном соединении элементов в системе оператор 16 подключает оператор 17, реализующий правило расчета вероятности безотказной работы  $j$ -й системы –  $P_j(t)$ , представленной последовательной моделью надежности.

Отсутствие условия применимости метода расчета последовательного соединения элементов приводит к необходимости передачи управления оператору 18. Оператор 18 проверяет условия применимости метода расчета параллельного соединения элементов, при выполнении которого оператором 19 по известному правилу вычисляется количественный показатель безотказности такого соединения.

При смешанной структуре соединения элементов в системе, приводимой к универсальным моделям надежности, оператор 18 включает в процесс функционирования алгоритма оператор 20, предопределяющий подобную структуру. При выделении простейших универсальных моделей надежности, вероятность безотказной работы  $j$ -й системы  $P_j(t)$  вычисляется в операторе 21 по правилу включения многообразных комбинаций последовательных и параллельных структур системы.

Некоторые системы (например, мостовое соединение элементов) могут иметь структуру, не приводимую к универсальным моделям надежности. Методы решения безотказности систем со сложной конфигурацией структуры, изложенные, например, в работах [5, 6], весьма специфичны, а алгоритмическое исполнение методов достаточно трудоемко и не всегда эффективно. Вследствие исключительности систем, не приводимых к универсальным моделям надежности, с одной стороны, и значительных затрат ресурсов при программировании аналитических формул, содержащих большое число членов (например, экспонент с различными, в том числе, близкими показателями), с другой стороны, обусловим отсутствие подобных вычислений в разработанном алгоритме.

Итак, в случае отсутствия возможности приведения структуры системы к сочетаниям последовательных и параллельных организаций взаимодействия элементов расчет безотказности подобной системы не осуществляется. Управление переходит на оператор 22, выполняющий процесс отказа оценки безотказности  $j$ -й системы и образующий тупиковую ветвь в структуре алгоритма. Информация об отсутствии частного решения передается на оператор 23.

При адаптации функциональных возможностей алгоритма данные количественной оценки безотказности  $j$ -й системы установленной структуры подаются от операторов 17 или 19, или 21 на операторы 23 и 24, предназначенные, соответственно, для индикации и документирования полученной информации.

Оператор 25 проверяет выполнение условия исследования заданного числа систем  $j < N$ . Если это условие выполняется, управление вновь передается оператору 4 для формирования номера следующей испытываемой системы. Из невыполнения проверяемого условия  $j < N$  следует воспроизведение заданного числа исследуемых систем, и управление переходит на оператор останова 26.

### Заключение

Таким образом, предлагаемый алгоритм является действенным инструментом расчета, оценки и количественного анализа вероятностных показателей безотказности систем различной структуры и определенности.

Вариант практического применения разработанного алгоритма возможен в структуре экспертных систем, относящихся к типологии систем искусственного интеллекта [9]. Включением разработанного алгоритма в состав механизма получения решений (решателя) экспертной системы исключается необходимость оперирования правилами – достаточно объемными конструкциями выражения связей, зависимостей между фактами и их комбинациями. Автоматическое подключение процедур-знаний, позволяющих выполнять вычисления или преобразования функций в определенной ситуации, исполняется алгоритмом в зависимости от данных операторов 2 – 4. Следовательно, механизм получения решений экспертной системы, содержащий полученный алгоритм, предполагается в максимальной оптимизации.

### Библиографический список

1. Дружинин, Г. В. Теория надежности радиоэлектронных систем в примерах и задачах / Г. В. Дружинин, С. И. Степанов, В. Л. Шихматова, Г. А. Ярыгин ; под ред. Г. В. Дружинина. – Москва : Энергия, 1976. – 448 с.
2. Алгоритм реализации адаптивной системы вибрационных испытаний бортовой радиоэлектронной аппаратуры / А. В. Лысенко, Г. В. Таньков, В. С. Калашников, Н. В. Горячев, И. И. Кочегаров // Надежность и качество сложных систем. – 2019. – № 2 (26). – С. 60–69.
3. Эксплуатация комплексов авиационного вооружения / под ред. А. И. Буравлева. – Москва : Изд-во ВВИА, 2006. – 287 с.
4. Коваленко, И. Н. Методы расчета высоконадежных систем / И. Н. Коваленко, Н. Ю. Кузнецов. – Москва : Радио и связь, 1988. – 176 с.
5. Козлов, Б. А. Справочник по расчету надежности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики / Б. А. Козлов, И. А. Ушаков. – Москва : Советское радио, 1975. – 472 с.
6. Гнеденко, Б. В. Математические методы теории надежности и их статистический анализ / Б. В. Гнеденко, Ю. К. Беляев, А. Д. Соловьев. – Москва : URSS, 2013. – 584 с.
7. Рудзит, Я. А. Основы метрологии, точность и надежность в приборостроении / Я. А. Рудзит, В. Н. Плуталов. – Москва : Машиностроение, 1991. – 304 с.
8. Александровская, Л. Н. Современные методы обеспечения безотказности сложных технических систем / Л. Н. Александровская, А. П. Афанасьев, А. А. Лисов. – Москва : Логос, 2001. – 206 с.
9. Робототехнические системы подготовки и контроля комплексов авиационного вооружения / под ред. В. Д. Закутаева. – Москва : Изд-во ВУНЦ ВВС ВВА, 2011. – 360 с.

### References

1. Druzhinin G. V., Stepanov S. I., Shikhmatova V. L., Yarygin G. A. *Teoriya nadezhnosti radioelektronnykh sistem v primerakh i zadachakh* [Theory of reliability of radio-electronic systems in examples and problems]. Moscow: Energiya, 1976, 448 p. [In Russian]
2. Lysenko A. V., Tan'kov G. V., Kalashnikov V. S., Goryachev N. V., Kochegarov I. I. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem* [Reliability and quality of complex systems]. 2019, no. 2 (26), pp. 60–69. [In Russian]
3. *Ekspluatatsiya kompleksov aviatsionnogo vooruzheniya* [Operation of aviation weapons systems]. Ed. by A. I. Buravlev. Moscow: Izd-vo VVIA, 2006, 287 p. [In Russian]
4. Kovalenko I. N., Kuznetsov N. Yu. *Metody rascheta vysokonadezhnykh sistem* [Methods for calculating highly reliable systems]. Moscow: Radio i svyaz', 1988, 176 p. [In Russian]
5. Kozlov B. A., Ushakov I. A. *Spravochnik po raschetu nadezhnosti apparatury radioelektroniki i avtomatiki* [Handbook for calculating the reliability of radio electronics and automation equipment]. Moscow: Sovetskoe radio, 1975, 472 p. [In Russian]
6. Gnedenko B. V., Belyaev Yu. K., Solov'ev A. D. *Matematicheskie metody teorii nadezhnosti i ikh statisticheskii analiz* [Mathematical methods of reliability theory and their statistical analysis]. Moscow: URSS, 2013, 584 p. [In Russian]

7. Rudzit Ya. A., Plutalov V. N. *Osnovy metrologii, tochnost' i nadezhnost' v priborostroenii* [Fundamentals of Metrology, accuracy and reliability in instrumentation]. Moscow: Mashinostroenie, 1991, 304 p. [In Russian]
8. Aleksandrovskaya L. N., Afanas'ev A. P., Lisov A. A. *Sovremennye metody obespecheniya bezotkaznosti slozhnykh tekhnicheskikh sistem* [Modern methods for ensuring the reliability of complex technical systems]. Moscow: Logos, 2001, 206 p. [In Russian]
9. *Robototekhnicheskie sistemy podgotovki i kontrolya kompleksov aviatsionnogo vooruzheniya* [Robotic systems for training and control of aviation weapons systems]. Ed. by V. D. Zakutaev. Moscow: Izd-vo VUNTs VVS VVA, 2011, 360 p. [In Russian]

**Подкопаев Александр Владимирович**

кандидат технических наук, доцент,  
Военный учебно-научный центр  
Военно-воздушных сил  
Военно-воздушной академии имени профессора Н.  
Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина  
(Россия, г. Воронеж, ул. Старых большевиков, 54А)  
E-mail: aleksanpodkopaev@mail.ru

**Подкопаев Илья Александрович**

инженер-испытатель,  
Государственный лётно-испытательный центр имени  
В. П. Чкалова  
(Россия, Московская область, г. Щелково-10,  
войсковая часть 15650-9)  
E-mail: podkopilya@mail.ru

**Podkopaev Aleksandr Vladimirovich**

candidate of technical sciences, associate professor,  
Air Force Military Educational and Scientific Center  
of Air Force academy named after professor  
N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin  
(54A Starykh bol'shevikov street, Voronezh, Russia)

**Podkopaev Ilya Aleksandrovich**

engineer and tester,  
State flight test center named after V.P. Chkalov  
(Military unit 15650-9, Shchelkovo-10,  
Moscow region, Russia)

**Образец цитирования:**

Подкопаев, А. В. Централизованный адаптивный алгоритм оценки безотказности сложных технических систем различной энтропии / А. В. Подкопаев, И. А. Подкопаев // Надежность и качество сложных систем. – 2020. – № 3 (31). – С. 20–27. – DOI 10.21685/2307-4205-2020-3-3.

А. А. Тюгашев

**ПРОБЛЕМЫ НАДЕЖНОГО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ  
СЛОЖНЫМИ СИСТЕМАМИ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ**

A. A. Tyugashev

**PROBLEMS OF RELIABLE INTELLIGENT MANAGEMENT  
OF COMPLEX SYSTEMS IN REAL TIME**

**Аннотация.** В самых разных сферах человечество использует сегодня сложные технические системы. Это автоматизированные производства, космические аппараты, атомные станции и пр. Подобные системы состоят из множества приборов, датчиков, исполнительных механизмов, объединенных в подсистемы различного назначения. Для выполнения системой поставленных перед ней целевых задач необходимо обеспечить согласованное во времени и по логике управления функционирование входящих в ее состав устройств. Средства управления должны реализовывать надежное и гибкое «интеллектуальное» управление в различных смыслах, анализируемых в статье. Описывается применение логики управляющих алгоритмов реального времени, ранее предложенной автором, для случая ограниченных доступных ресурсов. Также описаны специальные инструментальные программные средства поддержки верификации и синтеза необходимых средств управления.

**Ключевые слова:** интеллектуальное управление, управление сложными техническими комплексами, управляющий алгоритм реального времени, искусственный интеллект, верификация программ, формальные методы.

**Abstract.** The complex technical systems are used today in various areas. We can name transportation systems, automated manufactures, nuclear power plants, etc. Such system consists of subsystems with different objectives. Each subsystem includes dozens of devices, sensors, actuators, etc. To achieve the system's goals, the control means must provide well coordinated functioning of all these devices. We need the right coordination in time (real-time mode) and due to logical and physical reasons. The modern control should guarantee the completion of the system tasks even in case of some abnormal situations and unexpected external events. The paper is devoted to the definition of «intelligent real-time control for complex systems» and analysis of the most important features of needed control means. The paper also describes the application of real-time control algorithms logic for the systems with limited available resources. We present also some software tools for support of verification and synthesis of the complex system's control logic.

**Keywords:** intelligent control, management of complex technical complexes, real-time control algorithm, artificial intelligence, program verification, formal methods.

**Введение**

В XXI в. человечество использует значительное число сложных технических комплексов и систем. Автоматизированные производства, атомные электростанции, космические корабли могут быть названы в качестве характерных примеров [1–4].

Что мы вкладываем в действительности в понятие «сложной» системы? Во-первых, мы ожидаем увидеть наличие комплексной структуры с многими уровнями, часто – иерархически организованную. Иными словами, комплекс состоит из подсистем, которые в свою очередь включают в свой состав десятки датчиков, приборов, исполнительных механизмов и пр.

Во-вторых, мы подразумеваем сложное поведение, часто – в меняющемся внешнем окружении. Задача обеспечения подобного комплекса средствами гибкого и надежного управления является весьма нетривиальной. Здесь встает очередной вопрос: что понимать под «гибким» и «надежным» управлением?

Каждая техническая система создается для выполнения определенных функций – транспортировки пассажиров и грузов, выработки электроэнергии, производства изделий и пр. Соответственно, у нее будет наличествовать набор целей (функциональных задач).

Весьма важным аспектом многих современных сложных технических систем является функционирование в реальном режиме времени. Во многих случаях выполнение поставленных задач привязывается тем или иным способом к временной шкале. При этом задается пара «целевое состояние», «время». Нередко система должна обеспечить не просто достижение абстрактных «целей», а набор логически скоординированных и привязанных к определенным моментам времени действий. Например, для достижения главной цели необходимо предварительно реализовать выполнение набора подготовительных операций, тоже привязанных к шкале времени. Другие необходимые операции могут потребоваться после достижения главной цели (например, можно упомянуть чистку салона самолета по завершении перелета) [2, 4].

Системы реального времени можно разделить на реагирующие и «активные». Если моменты времени достижения поставленных целей изначально заданы, система имеет «активный характер», в отличие от пассивных «реагирующих» систем, находящихся в цикле ожидания внешних событий. Иногда действие имеет ненулевую продолжительность, представляя собой протяженный во времени процесс. Многие из процессов должны исполняться при этом параллельно. Для некоторых из функциональных процессов имеет значение синхронизация моментов их начала и окончания – способ организации параллельного выполнения. Во многих ситуациях, в том числе по соображениям безопасности, запрещено наложение определенных процессов друг на друга. К сожалению, основные известные модели в области моделирования поведения и управления сложными системами посвящены реагирующим системам.

А. А. Калентьевым предложена и автором настоящей статьи развита модель алгебры и логики управляющих алгоритмов реального времени, напротив, подходящая для описания поведения «активных» систем [3, 5].

Для нашего случая сложная техническая система, состоящая из различных приборов, датчиков и агрегатов, должна выполнить некоторый заданный план действий с привязкой к временной шкале (план-график). На самом деле имеется обычно не единственный план, а набор планов для различных вариантов развития событий, например, один для полностью штатного функционирования аппаратуры, другой – в случае возникновения одного из возможных отказов, третий – другого отказа, и т.д. Подобный план в аэрокосмической отрасли принято называть «циклограммой», представление о нем можно получить, глядя на рис. 1. На нем показан факт, что выполнение некоторого процесса не обязательно, а зависит от складывающейся ситуации, отражен цветом.

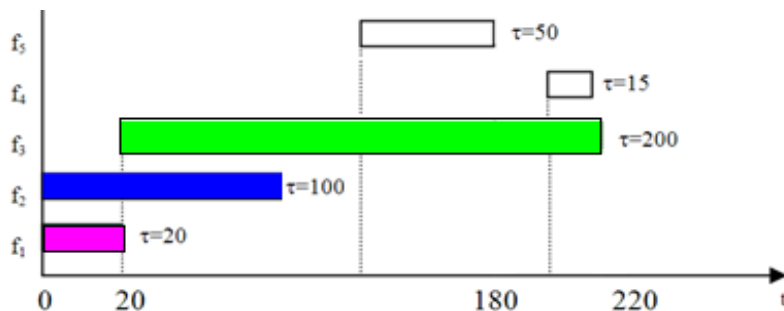


Рис. 1. Представление плана функционирования сложной системы

Для адекватного управления в условиях изменяющейся внешней среды и, возможно, наступления непредсказуемых событий, в системе должны быть заложены возможности гибкого реагирования на подобные ситуации. Должны при этом быть задействованы возможности различных входящих в состав системы приборов и устройств, основанных на применении разных физических принципов и явлений [6–8].

При этом следует иметь в виду, что управление современными сложными техническими комплексами реализуется на базе применения компьютеров, нередко – бортовой вычислительной сети. Реализация системного плана действий непосредственно выполняется управляющим программным обеспечением, реализующим логику управления, с внесением в нее необходимых вариантов.

В этой ситуации имеется еще одно следствие. Как известно, система, состоящая из большего числа элементов, обычно менее надежна, чем менее сложная (за исключением специальных случаев, когда усложнение специально вносится для повышения надежности, например, при использовании

дублирования). Получается, что говоря о надежном управлении, мы должны принимать во внимание и это обстоятельство.

Сложная система при надежном управлении должна обеспечить, как говорилось выше, выполнение поставленных задач даже при возникновении нештатных ситуаций, отказах частных приборов и пр. Достигают этого путем использования избыточности. Избыточность может быть структурной, когда важные приборы дублируются, и функциональной. В случае функциональной избыточности подразумевается, что прибор может выполнить дополнительные функции, взяв на себя обязанности, возложенные на иное устройство, возможно, с ухудшением точности или качества. Например, в системе ориентации космического корабля возможно использование разных видов датчиков – Солнца, Земли, звезд [6, 7]. Возможна ее разновидность – временная избыточность, когда функция выполняется, но медленнее, чем при штатной работе.

Для эффективного использования избыточности нам необходима заложенная еще на стадии проектирования в систему возможность реконфигурации. Реконфигурация в случае переключения на дублирующий комплект оборудования должна производиться путем выдачи специальных управляющих воздействий со стороны системы управления, выявляющей ее необходимость путем анализа показаний датчиков, измерений параметров и пр. В более сложной ситуации «интеллект» системы управления должен обладать знаниями о возможности замещения функций одного прибора другим, определять неисправности и подбирать возможные варианты парирования [6, 8].

В любом случае для выполнения поставленных задач будут необходимы определенные виды функциональности на заданных временных промежутках эксплуатации сложной системы.

Можно представить «сумму» того или иного вида необходимой функциональности, формируемую различными приборами, обладающими подобными возможностями. При этом функциональность прибора может зависеть от его текущего режима работы.

Анализ аномальных ситуаций и выполнение парирующих действий выполняются управляющим программным обеспечением, от коего непосредственно зависит достижение поставленных перед техническим комплексом целей. Подобное программное обеспечение (ПО) принято называть «критически важным» (*'Mission-Critical Software'*) [3, 5]. Например, ПО может выдавать на бортовую аппаратуру команды, переводимые в электрические импульсы. Примеры подобных команд: «Немедленно активировать устройство № 2 системы № 1» или «Отключить второй силовой гироскоп» [8, 9].

Переключение режимов работы устройств приводит к изменению уровней потребляемых ими ресурсов. Наиболее очевидным здесь является потребление электричества. Любой прибор как минимум будет иметь два состояния – «ВКЛ» и «ОТКЛ», в котором потребление равно нулю.

Могут быть и иные виды ресурсов, потребляемых при функционировании оборудования. При этом часть из этих ресурсов восполняемые (например, солнечные батареи вырабатывают, а не потребляют электрическую энергию), а некоторые – невосполняемые (например, запас ракетного топлива в баках космического аппарата).

В ходе функционирования сложной системы постоянно происходит переключение разных бортовых устройства из режима в режим и, соответственно, изменяются суммарные уровни потребления различных ресурсов. При этом существует максимально доступный уровень – «красная линия» – для каждого из видов ресурсов, который нельзя превышать.

Для успешной работы в описанных выше условиях необходимо, чтобы средства управления имели целый ряд важных особенностей. Мы должны иметь внутреннее представление о текущем состоянии самой управляемой системы (со средствами описания уровня функциональности/работоспособности оборудования) и ее окружения. Мы, помимо этого, должны иметь представление о целях с пониманием того, какие из них уже сделаны, а какие ждут исполнения в какие моменты времени.

Таким образом, выделим важнейшие черты подобной системы:

- непредсказуемая внешняя среда, представление о которой должно присутствовать в системе управления;
- разнообразное входящее в состав системы оборудование, организованное по иерархическому принципу;
- необходимость достижения набора поставленных перед системой целей;
- работа в режиме реального времени;

- система управления на базе современных цифровых ЭВМ;
- использование специального управляющего программного обеспечения, задающего текущую конфигурацию системы и режимы работы бортовых устройств;
- возможные отказы оборудования должны быть надлежащим образом скомпенсированы, а стоящие перед системой цели – достигнуты в любом случае;
- ограниченные уровни доступных ресурсов.

Таким образом, нам необходимо сначала построить адекватные модели для представления сложной системы с перечисленными чертами и средств управления ею.

### Моделирование управления сложной системой с ограниченными ресурсами

Для управления сложной технической системой в настоящее время используется специальное управляющее программное обеспечение (ПО) – комплекс управляющих алгоритмов реального времени [2, 3, 6]. Как правило, управляющий алгоритм реализуется соответствующим программным модулем. При этом в сложных современных системах выполнение модулей бортового программного обеспечения происходит в мультипрограммном режиме – параллельно.

Управляющий программный модуль может содержать различные операторы, но для нас важны следующие действия: 1) вызов другого модуля комплекса бортовых программ; 2) выдача команды управления на бортовую аппаратуру; 3) установка или сброс логического условия (признака, флага). Данные флаги влияют на реализацию системного плана. Например, флаг может означать «уровень заряда аккумуляторной батареи № 1 слишком низкий» или «основной двигатель вышел на рабочий режим». Полный набор подобных флагов формирует «вектор текущего состояния» сложной системы (ВТС), или «логический вектор». Подмножества ВТС могут рассматриваться как частные векторы состояния, например, определенной подсистемы [10]. Текущие значения логических условий, формирующих вектор состояния, определяют возможные сценарии исполнения управляющих алгоритмов, иными словами, какая из ветвей логики управления будет использована.

Различные сценарии исполнения управляющих программ задают разные привязанные по времени (таймированные) последовательности операций – разные варианты реализации системного плана или циклограммы (см. рис. 1). Как уже отмечалось, на самом деле мы должны реализовать набор вариантов системного плана с учетом возможных непредвиденных ситуаций и парирования отказов оборудования. На одной диаграмме операции и процессы, принадлежащие различным сценариям, могут быть выделены, например, цветом.

Дополнительная сложность реализации логики управления в данном случае обусловлена следующим обстоятельством. Каждый из управляющих алгоритмов, выполняемых параллельно, выполняет путем выдачи команд бортовым устройствам свои цепочки операций. При этом каждый из модулей управляющего ПО может запускать несколько других, которые в свою очередь – еще модули, и т.п. Мы должны учитывать дерево вызовов управляющих алгоритмов:  $УА_1 \rightarrow УА_2 \rightarrow УА_3 \dots$  (рис. 2).

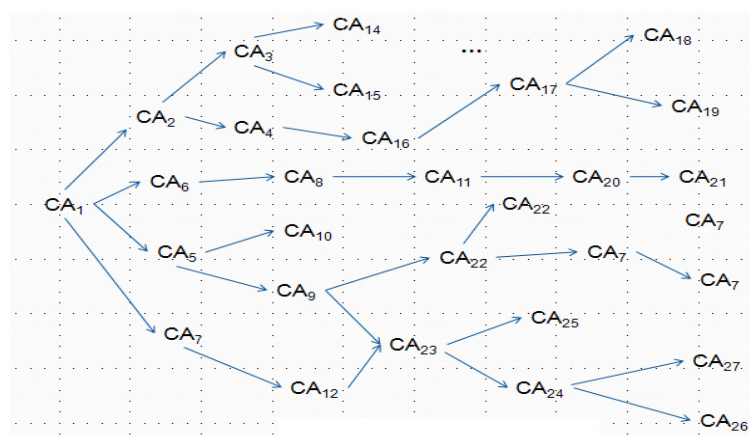


Рис. 2. Дерево вызовов управляющих программных модулей

В данных условиях человеку, планирующему логику управления сложной системой, практически невозможно полностью удерживать в голове все взаимосвязи между управляющими про-

граммными модулями и параллельно реализуемые ими цепочки действий, а также зависимости выполняемых действий от комбинаций логических условий – частных векторов состояния.

Еще одной проблемой становится проверка «устойчивости» или «согласованности» логики управления с точки зрения контроля отсутствия превышения максимально допустимых уровней потребления бортовых ресурсов на всем промежутке выполнения системой целевых задач и при всех возможных сценариях реализации логики управления.

Введем в рассмотрение следующие множества для моделирования сложной системы с данными характеристиками и ее средств управления [9]:

$EU = \{EU_i\}, i = 1 \dots N$  – множество устройств, входящих в состав системы;

$FA = \{FA_j\}, j = 1 \dots P$  – множество видов предоставляемой устройствами функциональности;

$AR = \{AR_j\}, j = 1 \dots M$  – множество необходимых ресурсов;

$Lim (AR_j) = \{ (LimAR_1, LimAR_2, \dots, LimAR_M) \}$  – набор максимально доступных уровней бортовых ресурсов;

$MD (BA_i) = \{ (MD_{i1}, MD_{i2} \dots MD_{iN}) \}$  – множество режимов работы аппаратных средств;

$CL (MD_{ik}) = \{ (CL_{i1}, CL_{i2} \dots CL_{iN}) \}$  – множество векторов потребления данным устройством в указанном режиме различных видов бортовых ресурсов.

### Проблема синтеза логики управления сложной системой

Каким образом мы можем описать логику управления представленной сложной системой в реальном времени? Обычно, говоря о логике, мы имеем в виду использование набора аксиом и правил вывода (рассуждений). Но что конкретно мы должны применить в данном случае? В качестве аксиом могут рассматриваться задания параметров базисных процессов (длительность, время начала), характеристики бортовых устройств (предоставляемая функциональность, потребление ресурсов в разных режимах) и пр. Правила вывода могут быть представлены как «ЕСЛИ {множество посылок/антецедентов}, ТО {следствия}» [11]. Для нашего случая сложной системы, работающей в режиме реального времени, предлагаем представление правил в следующем виде [12]:

$$\alpha_1(t_{u1}) \wedge \alpha_2(t_{u2}) \wedge \dots \wedge \alpha_M(t_{uM}) \rightarrow A_1(t_{A1}) \wedge A_2(t_{A2}) \wedge \dots \wedge A_N(t_{AN}). \quad (1)$$

В левой части мы видим набор логических условий  $\alpha_i$ , связанных связкой «И» и наличием, в случае необходимости, отрицания, в правой части (следствия) записываются действия  $A_j$ , которые необходимо выполнить в данной ситуации, причем привязанные к моментам времени  $t_{Aj}$ . При этом некоторые действия способны влиять на истинность или ложность проверяемых другими правилами логических условий. Благодаря тому, что в логике управления может присутствовать несколько правил с совпадающей правой частью, но различными левыми, их можно рассматривать как одно обобщающее правило, в левой части которого левые части интегрированных правил соединяются через связку логическое «ИЛИ». В силу универсализма дизъюнктивной нормальной формы, можно сделать вывод о способности представления подобным образом любых сложных условий, влияющих на функционирование сложной системы.

Начинать проектирование логики управления следует с определения набора системных целей (задач). При этом в связи с необходимостью функционирования сложной системы в режиме реального времени каждой из целей сопоставляется момент времени, в который она должна быть достигнута. Мы можем использовать следующее множество:

$Z = \{ (PT_j, t_j) \}$  – множество системных целей (задач) с заданным временем.

Комплекс бортовых управляющих алгоритмов может быть задан как

$$UA = \{ CA_m \}, m = 1 \dots U.$$

Затем проектирование логики управления подразумевает выполнение следующих шагов:

1. Определение отображений:

$$f_1: Z \rightarrow FA \rightarrow EU \rightarrow MD \rightarrow CL,$$

иными словами, определить переходы от множества системных задач к множеству необходимой функциональности и затем к множеству необходимого оборудования, активировать которое нужно для предоставления востребованной функциональности, их режимам работы и потребляемым ресурсам.

## 2. Определение отображения:

$$f_2: EU \rightarrow UA,$$

иными словами, определение отображения между элементами аппаратуры и управляющими ими программными модулями.

## 3. Задание временных параметров:

$$f_3: EU \rightarrow T \text{ и } UA \rightarrow T.$$

Определив перечисленные отображения, мы построим циклограмму функционирования различных устройств, входящих в состав сложной системы, мы сможем вычислить уровни потребления каждого вида ресурсов для всех сценариев, на всем интервале эксплуатации системы, как функции времени.

На заключительном шаге формируется набор кортежей

$$\{ \langle EU_i, UA_{ij}, t_i, l_i \rangle \}.$$

Здесь каждый из них определяет выполнение сценария  $UA_{ij}$ , стартующего в момент времени  $t_i$  в ситуации, определяемой логическим вектором  $l_i$ .

Логический вектор (вектор состояния системы) может выглядеть, например:

$$l = (\alpha_1 = TRUE, \alpha_2 = FALSE, \dots, \alpha_q = H),$$

где  $\alpha_i$  – конкретный признак (флаг, логическое условие). Некоторые из логических условий могут оказаться незначимыми для выполнения конкретного сценария, в этом случае, помимо значений 'ИСТИНА' и 'ЛОЖЬ', мы используем третье значение истинности 'H' («неважно»).

Используя построенные модели, для описания функционирования устройств, входящих в состав сложной системы и управляющих ими программных модулей, определить реально возникающие в логическом пространстве и во времени наложения их выполнения. Если представить их графически, мы получим: набор планов-график (циклограмм) для каждого сценария по каждому из рассмотренных видов описания поведения системы: работы оборудования, функционирования управляющих программных модулей, потребления ресурсов. Под руководством автора были разработаны инструментальные программные средства, использующие представленные подходы к моделированию, экран одного из которых показан на рис. 3. Видно отображение одного из видов циклограмм в левой части.

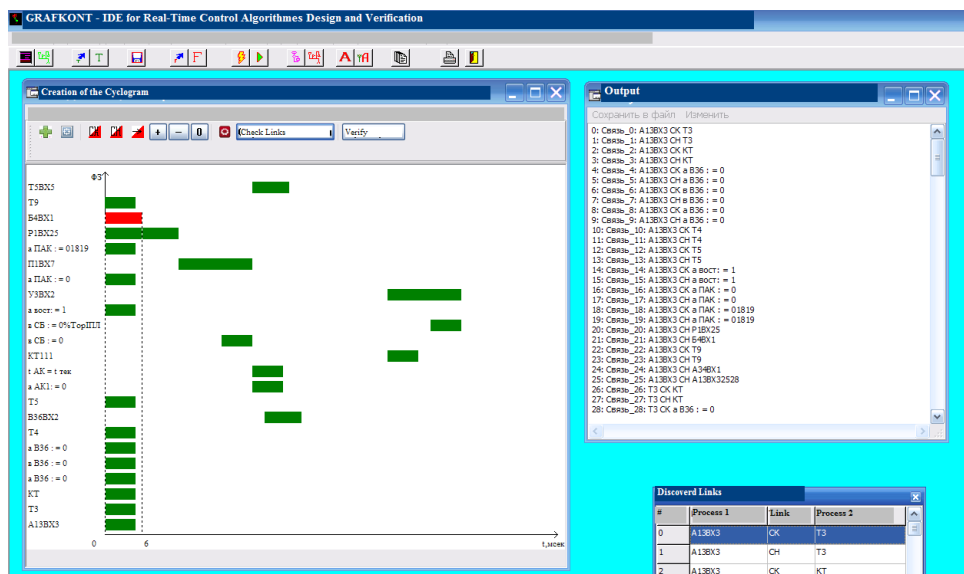


Рис. 3. Экран программного средства верификации управления сложной системой

Фактически набор планов-графиков может быть рассмотрен как набор правил логики управления сложной системой в реальном режиме времени в смысле (1). Действительно, в правой части

правил имеют места действия, привязанные к моментам времени. А левая часть (посылки) может соответствовать варианту плана-графика (циклограммы). На следующих шагах полученные правила должны найти то или иное практическое воплощение – это может быть прямое кодирование правил в исходных текстах управляющих программных модулей, автоматический синтез программ [3], использование базы знаний реального времени [7, 10] или иные подходы.

### **Проблема верификации логики управления сложной системой**

В предыдущем разделе описан подход, позволяющий осуществлять «прямое преобразование» – отталкиваясь от целей системы, в конечном итоге получить набор правил логики управления в реальном времени. При этом актуальна и обратная задача – проверить для уже реализованных средств управления сложной системой, действительно ли они реализуют необходимую логику управления и управление, «целостное» или «согласованное» с точки зрения следующих соображений:

- соответствие имеющимся временным ограничениям, например, требованиям предшествования между выполняемыми операциями, требованиям отсутствия наложения запрещенных для этого процессов друг на друга;

- функционирование набора устройств сложной системы во всех возможных сценариях и на всем временном интервале использования без превышения доступных предельных уровней по каждому из видов ресурсов;

- обеспечение надежности, иными словами, гарантия выполнения системных задач даже в случае возникновения нештатных ситуаций и отказов каких-либо приборов и устройств.

В случае обнаружения нештатной ситуации, связанной с конкретной аппаратной проблемой, логика управления должна предусматривать проверку соответствующих логических условий, входящих в состав нужного логического вектора, и выполнение адекватных парирующих действий. При этом мы должны проверить наличие в нужные моменты времени достаточного уровня функциональности для достижения системой всех поставленных перед ней целей.

Здесь можно выделить два вида верификации: верификация логики управления как таковой, и верификация правильности ее реализации конкретными средствами (как правило, логика управления «рассредоточена» в исходном коде управляющих программных модулей).

Для выполнения второго вида верификации необходимо сначала провести анализ управляющих программных модулей – «извлечение» из них правил логики управления, как в популярном сейчас подходе *software model checking* [13]. Для этого можно провести синтаксический анализ исходных текстов управляющих программных модулей с выделением управляющих конструкций, связанных с переключением режимов аппаратуры, передачей управления другим программам и выполнения проверок. Под руководством автора планируется разработка подобных инструментальных программных средств.

Для проверки с представленных точек зрения большого набора правил логики управления, представленных в форме (1), мы можем прибегнуть к использованию одного из перспективных подходов поиска решения в условиях ограничений, известных в современных информационных технологиях. Это программирование в ограничениях (*constraint programming*, CP), SAT-решатели (*boolean satisfiability – SAT solvers*), динамическое программирование (*dynamic programming – DP*), SMT-решатели (*Satisfiability Modulo Theories*). В ряде случаев доступны на условиях свободной лицензии так называемые «решатели», использующие для поиска решений достаточно развитые и оптимизированные алгоритмы [14]. Доступ к возможностям подобных решателей возможен через использование интерфейса прикладного программирования (API), а в некоторых случаях – даже онлайн в сети Интернет.

Ответом решателя может быть «sat», удовлетворяющий поставленным требованиям/ограничениям, «unsat» – для противоположного случая.

Однако когда мы хотим использовать подобный решатель, перед нами встает следующая проблема. Каждый из них использует свой собственный язык и свои собственные средства моделирования для постановки задачи верификации. Соответственно, нам необходимо предварительно «погрузить» модели нашей предметной области в термины, используемые данным решателем (например, библиотеки *smt-lib*).

В работе [15] описан пример использования возможностей SMT-решателя Z3 для проверки выполнения ограничений синхронизации в логике управления, для чего был разработан прототип

специального программного инструмента-верификатора. Представляется, что аналогичный подход применим и перспективен и для проверки согласованности и «надежности интеллектуального управления» в смысле, представленном в настоящей статье.

### Заключение

В статье представлены математические модели для описания логики управления сложными техническими комплексами в режиме реального времени и в условиях непредсказуемой внешней среды. Дискутируется смысл понятия «надежного» и «интеллектуального» управления с учетом ограниченности доступных ресурсов и допустимых выбросов при необходимости выполнения всех поставленных перед системой задач, несмотря на возможные отказы аппаратуры.

В настоящее время автор координирует разработку специальных программных инструментов, позволяющих осуществлять верификацию существующей логики управления, заложенной в управляющем программном обеспечении.

Для решения задачи синтеза и верификации подобной логики с учетом ограничений по ресурсам и гарантий выполнения целевых задач, мы предполагаем в будущем задействовать потенциал SMT-решателей (Satisfiability Model Theories Solvers) [15].

### Библиографический список

1. Мостовой, Я. А. Лекции по управлению сложными техническими системами : учеб. пособие / Я. А. Мостовой. – Самара : ФГБОУ ВПО ПГУТИ, 2014. – 192 с.
2. Хартов, В. В. Автономное управление космическими аппаратами связи, ретрансляции и навигации / В. В. Хартов // Авиакосмическое приборостроение. – 2006. – № 6. – С. 29–33.
3. Калентьев, А. А. ИПИ/CALS технологии в жизненном цикле комплексных программ управления / А. А. Калентьев, А. А. Тюгашев. – Самара : Изд-во Самарского научного центра РАН, 2006.
4. Колташев, А. А. Эффективная технология управления циклом жизни бортового программного обеспечения спутников связи и навигации / А. А. Колташев // Авиакосмическое приборостроение. – 2006. – № 12. – С. 20–25.
5. Тюгашев, А. А. Интегрированная среда для проектирования управляющих алгоритмов реального времени / А. А. Тюгашев // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2006. – № 2. – С. 128–141.
6. Кирилин, А. Н. Методы обеспечения живучести низкоорбитальных автоматических КА зондирования Земли: математические модели, компьютерные технологии / А. Н. Кирилин, Р. Н. Ахметов, А. В. Соллогуб, В. П. Макаров. – Москва : Машиностроение, 2010.
7. Ахметов, Р. Н. Проблемы реинжиниринга автоматических космических аппаратов в аномальных полетных ситуациях и пути их решения на основе базы знаний / Р. Н. Ахметов, В. П. Макаров, А. В. Соллогуб // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2014. – № 1(43). – С. 9–20.
8. Тюгашев, А. А. Подход к обеспечению отказоустойчивости космических аппаратов на основе автоматизации проектирования интеллектуальных бортовых программных средств / А. А. Тюгашев // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 2 (14). – С. 9–16.
9. Калентьев, А. А. Разработка информационной поддержки процесса проектирования управляющих алгоритмов бортовых комплексов управления космических аппаратов / А. А. Калентьев, Ю. М. Сыгуров // Вестник СГАУ. – 2010. – № 21 (1). – С. 58–62.
10. Tyugashev, A. A. Visual Builder of Rules for Spacecraft Onboard Real-Time Knowledge Base / A. A. Tyugashev // Proc. 8th KES International Conference on Intelligent Decision Technologies (KES-IDT 2016). – Tenerife, Spain, 2016. – Part II. – P. 189–205.
11. Тюгашев, А. А. Логическое исчисление управляющих алгоритмов / А. А. Тюгашев, А. Ю. Богатов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2013. – Т. 1. – С. 181–193.
12. Тюгашев, А. А. Использование расписаний при моделировании семантики управляющих алгоритмов реального времени / А. А. Тюгашев, А. Ю. Богатов, А. В. Шулындин // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2011. – Т. 1. – С. 90–93.
13. Holzmann, G. J. Software model checking: Extracting verification models from source code / G. J. Holzmann, M. H. Smith // Software Testing, Verification and Reliability. – 2001. – Vol. 11, № 2. – P. 65–79.
14. Garcia, M. The Future of Optimization Technology Constraints / M. Garcia, P. Stuckey, V. H. Pascal, M. Wallace // International Symposium on Intelligent and Distributed Computing IDC 2014. – 2014. – Vol. 19. – P. 126–138.
15. Tyugashev, A. A. Application of SMT solvers for evaluation of Real-Time control logic of spacecraft / A. A. Tyugashev // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – № 1096 (1). – P. 012156.

## References

1. Mostovoy Ya. A. *Leksii po upravleniyu slozhnymi tekhnicheskimi sistemami: ucheb. posobie* [Lectures on managing complex technical systems: textbook]. Samara: FGBOU VPO PGUTI, 2014, 192 p. [In Russian]
2. Khartov V. V. *Aviakosmicheskoe priborostroenie* [Aerospace instrument-making]. 2006, no. 6, pp. 29–33. [In Russian]
3. Kalent'ev A. A., Tyugashev A. A. *IPI/CALS tekhnologii v zhiznennom tsikle kompleksnykh programm upravleniya* [IPI / CALS technologies in the life cycle of integrated management programs]. Samara: Izd-vo Samarskogo nauchnogo tsentra RAN, 2006. [In Russian]
4. Koltashev A. A. *Aviakosmicheskoe priborostroenie* [Aerospace instrument-making]. 2006, no. 12, pp. 20–25. [In Russian]
5. Tyugashev A. A. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Teoriya i sistemy upravleniya* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Theory and control systems]. 2006, no. 2, pp. 128–141. [In Russian]
6. Kirilin A. N., Akhmetov R. N., Sollogub A. V., Makarov V. P. *Metody obespecheniya zhivuchesti nizkoorbital'nykh avtomaticheskikh KA zondirovaniya Zemli: matematicheskie modeli, komp'yuternye tekhnologii* [Methods for ensuring the survivability of low-orbit automatic earth sensing spacecraft: mathematical models, computer technologies]. Moscow: Mashinostroenie, 2010. [In Russian]
7. Akhmetov R. N., Makarov V. P., Sollogub A. V. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta* [Bulletin of the Samara state aerospace University]. 2014, no. 1 (43), pp. 9–20. [In Russian]
8. Tyugashev A. A. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem* [Reliability and quality of complex systems]. 2016, no. 2 (14), pp. 9–16. [In Russian]
9. Kalent'ev A. A., Sygurov Yu. M. *Vestnik SGAU* [SGAU Bulletin]. 2010, no. 21 (1), pp. 58–62. [In Russian]
10. Tyugashev A. A. *Proc. 8th KES International Conference on Intelligent Decision Technologies (KES-IDT 2016)*. Tenerife, Spain, 2016, part II, pp. 189–205.
11. Tyugashev A. A., Bogatov A. Yu. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2013, vol. 1, pp. 181–193. [In Russian]
12. Tyugashev A. A., Bogatov A. Yu., Shulyndin A. V. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2011, vol. 1, pp. 90–93. [In Russian]
13. Holzmann G. J., Smith M. H. *Software Testing, Verification and Reliability*. 2001, vol. 11, no. 2, pp. 65–79.
14. Garcia M., Stuckey P., Pascal V. H., Wallace M. *International Symposium on Intelligent and Distributed Computing IDC 2014*. 2014, vol. 19, pp. 126–138.
15. Tyugashev A. A. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018, no. 1096 (1), p. 012156.

**Тюгашев Андрей Александрович**

доктор технических наук, профессор,  
кафедра вычислительной техники,  
Самарский государственный  
технический университет  
(Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244)  
E-mail: tau797@mail.ru

**Tyugashev Andrey Aleksandrovich**

doctor of technical sciences, professor,  
sub-department of computer engineering,  
Samara State Technical University  
(244 Molodogvardeyskaya street, Samara, Russia)

**Образец цитирования:**

Тюгашев, А. А. Проблемы надежного интеллектуального управления сложными системами в режиме реального времени / А. А. Тюгашев // Надежность и качество сложных систем. – 2020. – № 3 (31). – С. 28–36. – DOI 10.21685/2307-4205-2020-3-4.

В. А. Острейковский, Е. Н. Шевченко**ОБ УЧЕТЕ СВОЙСТВА НЕОБРАТИМОСТИ ПРОЦЕССОВ  
В ЗАДАЧАХ ОЦЕНКИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ СТРУКТУРНО  
И ФУНКЦИОНАЛЬНО СЛОЖНЫХ СИСТЕМ**V. A. Ostreykovsky, E. N. Shevchenko**ON TAKING INTO ACCOUNT THE PROPERTIES OF IRREVERSIBILITY  
OF PROCESSES IN THE PROBLEMS OF ASSESSING THE DURABILITY  
OF STRUCTURALLY AND FUNCTIONALLY COMPLEX SYSTEMS**

**Аннотация.** Актуальность и цели. В последние десятилетия XX в. появилась новая наука – физика неравновесных процессов, оперирующая новыми понятиями: самоорганизация и диссипативные структуры, и по-новому описывающая однонаправленность времени (стрелу времени) и термин «необратимость». Этот термин тесно связан с центральным принципом книг [1–3]: асимметрией времени и оператором внутреннего времени, следовательно, с сущностью понятия долговечность в терминах надежности и безотказности и эффективности структурно и функционально сложных систем (СФСС) и, что особенно важно, критически важных технических систем. В своей книге [1], первое издание которой вышло в свет еще в 1980 г., нобелевский лауреат И. Р. Пригожин изложил формулировку трех главных тезисов для включения необратимости как фундаментального принципа современной науки: необратимые процессы столь же реальны, как и обратимые; необратимые процессы играют существенную конструктивную роль в физическом мире; необратимость глубоко связана с динамикой. Прошла почти половина века после этого события, а учет эволюции времени как главного фактора в инженерных расчетах конструкций систем практически нигде не используется. В подавляющем большинстве государственные стандарты по вопросам долговечности как в нашей стране, так и за рубежом по-прежнему основаны на методах классической динамики теорий длительной прочности. Такие методы, конечно, необходимы, однако перспективные вопросы учета эволюции времени в модусах «прошлое – настоящее – будущее» для объектов, сроки применения которых могут исчисляться многими десятилетиями (а таких уже немало), бесспорно, должны стать достижениями соответствующих НИИ и КБ. Поэтому целью данной статьи является анализ свойств необратимости процессов именно на всех этапах жизненного цикла СФСС в свете оценки таких показателей долговечности, как ресурс, срок службы и их остаточные значения в современной проблеме времени

**Abstract.** Background. In the last decades of the 20th century, a new science has appeared – the physics of nonequilibrium processes, operating with new concepts: self-organization and dissipative structures, and in a new way describing the unidirectionality of time (the arrow of time) and the term "irreversibility". This term is closely related to the central principle of books [1-3]: the asymmetry of time and the internal time operator, therefore, with the essence of the concept of durability in terms of reliability and reliability, and the effectiveness of structurally and functionally complex systems (SSSS) and, most importantly, critical technical systems. In his book [1], the first edition of which was published back in 1980, Nobel laureate I.R. Prigozhin set forth the formulation of three main theses for the inclusion of irreversibility as a fundamental principle of modern science: irreversible processes are as real as reversible; irreversible processes play an essential constructive role in the physical world; irreversibility is deeply connected with dynamics. Almost half a century has passed after this event, and the era of taking into account the evolution of time as the main factor in engineering calculations of system designs has not changed. The vast majority of state standards on longevity issues both in our country and abroad are still based on the methods of classical dynamics of theories of long-term strength. Such methods, of course, are necessary, however, promising issues of taking into account the evolution of time in the "past – present – future" modes for objects whose terms of application can take many decades (and there are many of them already) should undoubtedly become the achievements of the corresponding research institutes and design bureaus. Therefore, the purpose of this article is to analyze the properties of the irreversibility of processes precisely at all stages of the SPSS life cycle in the light of evaluating such indicators of longevity as a resource, service life and their residual values in the modern problem of time "past – present – future". *Materials and methods.* To implement this idea, a brief analysis of existing approaches to assessing the durability of complex systems using the theory of functional

«прошлое – настоящее – будущее». *Материалы и методы.* Для реализации этой идеи проведен краткий анализ существующих подходов к оценке долговечности сложных систем с применением теории операторов функционального анализа. *Результаты.* В статье подробно проанализированы детерминированные и вероятностные концепции природы времени и роль закономерностей необратимых процессов в этих концепциях. *Выводы.* 1. Систематизированы следствия из принятия второго начала термодинамики как фундаментального факта. 2. Хаос к несводимому вероятностному описанию динамических систем. 3. Оператор внутреннего времени  $T$  – это нелокальный оператор, порождающий новое описание классической динамики для сильно неустойчивых систем. 4. Применение оператора внутреннего времени системы позволяет по-новому оценивать «возраст» оборудования СФСС, соответствующий средним значениям таких показателей долговечности, как ресурс, срок службы и их остаточные значения.

**Ключевые слова:** необратимость, операторы эволюции и внутреннего времени, модусы времени «прошлое – настоящее – будущее», долговечность, ресурс, срок службы.

analysis operators has been carried out. *Results.* The article analyzes in detail the deterministic and probabilistic concepts of the nature of time and the role of the laws of irreversible processes in these concepts. *Conclusions.* 1. The consequences of the adoption of the second law of thermodynamics as a fundamental fact are systematized. 2. Chaos to an irreducible probabilistic description of dynamical systems. 3. The internal time operator  $T$  is a non-local operator that generates a new description of classical dynamics for highly unstable systems. 4. The use of the system's internal time operator allows a new assessment of the "age" of the SSSS equipment, which corresponds to the average values of such indicators of durability as a resource, service life and their residual values.

**Keywords:** irreversibility, evolution and internal time operators, "past – present – future" time modes, durability, resource, service life.

### Сущность свойства необратимости процессов в функциональном описании систем

Вторая половина XX в. ознаменована рождением новой науки – физики неравновесных процессов. Известно, что в природе все процессы подразделены на два класса: обратимые и необратимые. И если необратимые процессы являются правилом, то обратимые – исключением. Примеры обратимых процессов: движение маятника (движение тел) без трения в пространстве, в котором исключено взаимодействие со средой, но совершенно ясно, что исключить такое взаимодействие невозможно.

Примеры необратимых процессов: вязкость, диффузия, распад нестабильных частиц и другие диссипативные структуры.

Отказываясь от траекторий, например, применяя ансамблевый подход, отказываемся от строгого детерминизма, т.е. делаем только статистические выводы, т.е. предсказываем средние результаты, даже зная рождение и рост парадигм и их упадок.

Обратимым процессам присущ строгий детерминизм, и самое главное, в обратимых процессах время течет одинаково как при  $t \rightarrow -\infty$ , так и при  $t \rightarrow +\infty$ .

Совсем иначе ведут себя необратимые процессы, такие как диффузия, вязкость и другие диссипативные структуры, изучаемые в физике неравновесных процессов. Неравновесные процессы имеют ярко выраженную однонаправленность времени: зная их прошлое, очень трудно предсказать будущее. Эффект однонаправленного времени позволяет по-новому интерпретировать термин «необратимость». Об этом красноречиво свидетельствует следующий пример – метеорологический прогноз.

Если мы можем предсказывать положение Земли на орбите вокруг Солнца установленной динамической системой двух тел на миллионы лет вперед, то прогноз погоды описывается моделями, содержащими до 6 млн переменных, и погрешность предсказания увеличивается каждые три дня. Это происходит от того, что детерминистические симметричные во времени законы соответствуют только весьма частным случаям и верны для устойчивых динамических классических и квантовых систем.

В дополнение к динамике нельзя не сказать и о химической необратимости. Неравновесные химические реакции могут приводить к необратимости и при определенных условиях могут стать началом новых типов эволюции систем.

Таковыми необратимыми процессами являются процессы распада ядер тяжелых металлов – радиоактивное излучение и существование нестабильных частиц. Согласно трудам Л. Больцмана, необратимость, присущая второму закону термодинамики, несовместима с обратимыми законами классической динамики.

Таким образом, можно констатировать словами Л. Больцмана [4], что «необратимость есть проявление в макроскопическом масштабе «стохастичности», существующей в микроскопическом масштабе». Каково же происхождение этой случайности, рассмотрим далее в данной статье.

### **Необратимость в описании систем на основе концепции второго начала термодинамики**

Второй закон классической механики И. Ньютона оперирует фундаментальным уравнением (1687) [5], устанавливающим зависимость между силой  $F$ , массой  $m$  и ускорением  $\omega$ :

$$m\omega = F, \quad (1)$$

в котором нет различия между прошлым  $t \rightarrow -\infty$  и будущим  $t \rightarrow +\infty$ , т.е. уравнение (1) инвариантно относительно обращения времени.

Однако уже в девятнадцатом столетии Р. Клаузиус ввел в науку понятие «энтропия» ( $S$  – функция) для изолированных систем (1865) [6], которые не обмениваются с внешним миром ни энергией, ни веществом, монотонно возрастает до тех пор, пока не достигает своего максимального значения в состоянии термодинамического равновесия:

$$\frac{dS}{dt} \geq 0. \quad (2)$$

В дальнейшем оказалось, что соотношение (2) справедливо и для систем, обменивающихся с внешней средой и веществом, и энергией (второе начало термодинамики):

$$dS = d_e S + d_i S, \quad d_i S \geq 0, \quad (3)$$

где  $d_e S$  – определяет перенос энтропии через границы системы, а  $d_i S$  – производство энтропии внутри системы. И самое главное: вклад в производство энтропии внутри системы вносят только необратимые процессы.

Таким образом, второе начало термодинамики как фундаментальный закон устанавливает: необратимые процессы типа химических реакций, теплопроводности, диффузии и других (например, для детально описанных процессов СФСС [7–10]) приводят к росту энтропии и, следовательно, к односторонней направленности времени. Это можно сформулировать и по-другому: второе начало термодинамики: положительное направление времени второе начало термодинамики связывает с возрастанием энтропии.

Для замкнутых систем, которые обмениваются с внешним миром энергией, но не веществом, производство энтропии определяется теплом  $Q$ , получаемым от внешней среды:

$$d_e S = \frac{dQ}{T^0}, \quad d_i S \geq 0, \quad (4)$$

где  $T^0$  – абсолютная температура.

При объединении первого начала термодинамики с соотношением (4) для замкнутой системы имеем

$$dE = dQ - pdV, \quad (5)$$

где  $E$  – энергия,  $p$  – давление,  $V$  – объем, т.е. энергия, которой система обменивается с внешним миром за небольшой промежуток времени  $dt$ , состоит из теплоты, получаемый системой, и механической работой, произведенной над границей системы.

Тогда полный дифференциал энтропии равен

$$dS = \frac{dE}{T^0} + p \frac{dV}{T^0}. \quad (6)$$

Дж. Гиббс в работе [11] обобщил соотношение (6) на случай неоднородного по составу тела:

$$dS = \left( \frac{\partial S}{\partial E} \right) dE + \left( \frac{\partial S}{\partial V} \right) dV + \sum_{\gamma} \left( \frac{\partial S}{\partial n_{\gamma}} \right) dn_{\gamma} = \frac{dE}{T^0} + \frac{p}{T^0} dV - \sum \frac{m_{\gamma}}{T^0} dn_{\gamma}, \quad (7)$$

где  $m_{\gamma}$  – химические потенциалы Дж. Гиббса.

Для случая линейной неравновесной термодинамики формула (6) допускает обобщение вида

$$dS = \sum_j X_j J_j, \quad (8)$$

где  $J_j$  – скорости различных необратимых процессов (химических реакций, тепловых потоков, диффузии и др.), протекающих в системе;  $X_j$  – соответствующие обобщающие силы (сродства, градиенты температур, химических потенциалов и т.д.).

Следовательно, формула (8) является основной зависимостью макроскопической термодинамики необратимых процессов.

Из принятия второго начала термодинамики как фундаментального факта можно сделать в качестве выводов следующие следствия:

*Следствие 1.* Энергия мира постоянна. Энтропия мира возрастает.

*Следствия 2.* Производство энтропии порождает стрелу времени.

*Следствия 3.* Двойственный характер необратимых процессов. Производство энтропии создает как порядок, так и беспорядок.

*Следствие 4.* Вселенная появилась в результате необратимых процессов в квантовом вакууме.

*Следствие 5.* Проблема «пространство – время» в современной космологии может быть решена только с учетом необратимости и нарушения симметрии времени.

Здесь необходимо отметить заслуги отечественных и зарубежных ученых в развитии динамики и термодинамики, таких как: Р. Клаузиус, Л. Больцман, А. М. Ляпунов, В. И. Вернадский, Н. Н. Боголюбов, Б. Мистра, А. А. Власов, Н. Е. Крылов, М. А. Леонтович, И. Р. Пригожин, Ю. Л. Климонтович и др.

### **Статистическое описание необратимости в теории долговечности оборудования структурно и функционально сложных систем**

В настоящее время в науке существует две формулировки законов физики: первая основана на использовании траектории или волновых функций, вторая – на теории ансамблей Гиббса и Эйнштейна. С динамической точки зрения вторая формулировка, будучи примененной к отдельным траекториям или волновым функциям, сводится к первой. Теперь переходим к третьей формулировке, имеющей совершенно иной статус: она применима только к ансамблю и справедлива только для хаотических систем. Она образует базис для синтеза, объединяющего свойства микромира и макромира поскольку вводит необратимость в фундаментальное описание систем.

Динамические системы подразделяются на устойчивые и неустойчивые, крайним случаем неустойчивых систем являются «хаотические системы», для которых описание в терминах траекторий становится недостаточным, поскольку траектории, первоначально сколь угодно близкие, со временем экспоненциально расходятся... Хаос также появляется при изучении макроскопических необратимых процессов... «Негативные» аспекты хаоса – невозможность определенных предсказаний вследствие экспоненциальной расхожимости траекторий. Это соответствует «чувствительности к начальным условиям» – обычному определению хаоса. Это позитивные аспекты хаоса. Так как траектории становятся чрезмерной идеализацией, то приходится обратиться к вероятностному описанию в терминах ансамбля траекторий. Гиббс и Эйнштейн развили этот подход в статистической физике. Очень важное обстоятельство свидетельствует также о следующем:

1) вероятностное описание, вводимое для хаотических систем, несводимо, т.е. не применимо к отдельной траектории. Это строгий результат, полученный в ходе применения к анализу хаоса методов современного функционального анализа. В таком необратимом вероятностном описании прошлое и будущее играют разные роли;

2) хаос приводит к включению стрелы времени в фундаментальное динамическое описание;  
 3) хаос позволяет разрешить парадокс времени, но он делает и нечто больше: он привносит вероятность в классическую динамику как наиболее признанный прототип детерминистической науки. В данном контексте вероятность выступает не как порождение нашего незнания, а как неизбежное выражение хаоса.

Таким образом, хаос приводит к несводимому вероятностному описанию динамических систем. И как вывод: все системы, допускающие несводимое вероятностное описание, по определению считаются хаотическими. Такие системы допускают описание не в терминах отдельных траекторий (или волновых функций в квантовой механике), а только в терминах ансамблей траекторий. И, следовательно, у всех систем, соответствующих функциональному описанию природы в терминах взаимодействующих факторов, столь широкое обобщение понятия хаоса позволяет констатировать необходимость новой формулировки законов физики.

Для описания свойства необратимости широко используется язык операторов современного функционального анализа. Исторически широко применяются подходы классической и квантовой механики: оператор Лиувилля  $L$  (1809–1882 гг.) и Гамильтона  $H_{on}$  (1853 г.):

$$i \frac{\partial \rho}{\partial t} = L \rho \quad (9)$$

и

$$i \hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = H_{on} \Psi, \quad (10)$$

где  $i = \sqrt{-1}$ ,  $\rho(q_1, \dots, q_s, p_1, \dots, p_s)$  – плотность точек в ансамбле частиц с координатами  $q$  и импульсами  $p$ , а величина  $\rho dq_1, \dots, dq_s, dp_1, \dots, dp_s$  – вероятность нахождения представленных точек в момент времени  $t$  в элементе объема  $dq_1, \dots, dq_s, dp_1, \dots, dp_s$  фазового пространства,  $\hbar$  – постоянная Планка,  $\Psi$  – волновая функция – амплитуда вероятности (квадрат ее модуля равен вероятности состояния).

Формальное решение уравнений (9) и (10) имеет вид уравнения Лиувилля (9):

$$\rho(t) = e^{-iLt} \rho(0) \quad (11)$$

и уравнения Шредингера (10):

$$\rho(t) = e^{-iHt} \rho(0) e^{iHt}. \quad (12)$$

Позднее в конце XIX – начале XX в., вместо функций координат и импульсов в динамическое описание системы были введены:

- 1) А. Пуанкаре – оператор микроскопической энтропии  $M$ ;
- 2) функции Ляпунова, разработанные в 1886–1902 гг.;
- 3) оператор времени  $T$ , введенный Б. Мистрой (1978) [12].

Кроме этого, для эргодических систем Б. Мистра в указанной работе доказал, что для существования оператора  $M$  необходимым условием является фактор перемешивания, а достаточным – наличие  $K$ -потока (КАМ-теория А. И. Колмогорова, В. И. Арнольда и Ю. К. Мозера) [13]. Суть этой теории: неинтегрируемость есть новый исходный путь для построения динамики. Согласно теории КАМ в природе наблюдаются два типа траектории: «хорошие» детерминистические траектории и «случайные» с резонансными, которые беспорядочно блуждают в областях фазового пространства. И в случае хаоса резонансы порождают необычайно сложное поведение системы в фазовом пространстве с экспоненциальным разбеганием первоначально близких траекторий и диффузией с последующими эффектами приближения к равновесному распределению точек в будущем, т.е. к нарушению временной симметрии.

Б. Мистра в работе [12] доказал, что в случае  $K$ -потока оператор энтропии  $L$  можно сопоставить такой сопряженный эрмитов оператор времени  $T$ , что их коммутатор равен константе

$$-i[L, T] = -i[LT - TL] = I, \quad (13)$$

где  $I$  – единичный оператор.

Так как оператор  $L$  формально соответствует производной по времени (9), то сопряженный оператор  $T$  соответствует «времени» в том смысле, что представление

$$L \rightarrow i \frac{\partial}{\partial t}, T \rightarrow t \quad (14)$$

удовлетворяет коммутационному соотношению (13), т.е. можно дополнить динамику оператором  $T$ , представляющим флуктуирующее время. В работе [1, с. 200] И. Р. Пригожин показал осуществимость перехода от динамического описания к вероятностному с помощью оператора преобразования  $\Lambda$  с помощью нового понятия времени, позволяющего рассчитывать «средний возраст» отдельных состояний системным оператором внутреннего времени  $T$ , который существенно отличается от обычного внешнего временного оператора  $t$ . С этой целью на базе зависимости (13) можно, используя оператор эволюции времени вида  $U = e^{-iLt}$ , который известен из уравнения (11) Лиувилля, получить соотношение с оператором  $T$  в виде

$$U_t^T T U_t = T + tI. \quad (15)$$

В работе [1] доказано, что физический смысл нового оператора внутреннего времени  $T$  – это нелокальный оператор, порождающий новое описание классической динамики для сильно неустойчивых систем.

Опуская промежуточные аналитические выкладки, И. Р. Пригожин строго доказал, что если оператор внутреннего времени существует, то каждому состоянию неустойчивой системы  $\rho$  будет соответствовать средний возраст  $\langle T \rangle_\rho$  по формуле

$$\langle T \rangle_\rho = \frac{\langle \underline{\rho}, T \underline{\rho} \rangle}{\langle \underline{\rho}, \underline{\rho} \rangle}, \quad (16)$$

где каждая функция распределения системы  $\rho$  допускает разложение по собственным функциям  $\{1, \varphi_{n,i}\}$ :  $\varphi_{n,i}$  – это полный набор собственных функций оператора внутреннего времени  $T$ ; индекс  $n$  – собственное значение оператора  $T$ ; индекс  $i$  – степень вырождения собственного значения  $n$ :

$$\rho = 1 + \sum_{n=-\infty}^{+\infty} C_n \varphi_n, \quad (17)$$

$\underline{\rho}$  – избыток  $\rho$  по сравнению с равномерным равновесным распределением

$$\underline{\rho} = \rho - 1 = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} C_n \varphi_n. \quad (18)$$

Теперь, зная (18) и ортонормированность функции  $\varphi_n$ , можно преобразовать уравнение (16) к виду

$$\langle T \rangle_\rho = \frac{\sum n c_n^2}{\sum c_n^2} = \langle n \rangle. \quad (19)$$

Из уравнения (15) следует

$$\langle T \rangle_{\rho_t} = \langle T \rangle_{\rho_0} + t \quad (20)$$

и средний возраст состояния системы  $\underline{\rho}$  «идет эквидистантно» с внутренним временем или временем  $t$ , отсчитываемым по обычным часам. При этом легко можно показать, что

$$d \langle \delta T^2 \rangle = 0, \quad (21)$$

где  $\langle \delta T^2 \rangle = \langle T^2 \rangle - \langle T \rangle^2$ , т.е. дисперсия внутреннего времени остается постоянной.

Из приведенных сведений следуют важные выводы:

1. Среднее значение «возраста» систем соответствует средним значениям ресурса, срока службы и их остаточным значениям как основным показателям долговечности СФСС.
2. Зная аналитические выражения реальных необратимых процессов, имеющих место быть при применении конструктивных элементов, блоков и подсистем по назначению и изменению их под количественным воздействием внутренних и внешних факторов на микроскопическом и макроскопическом уровнях (например, детально изложенным в работе [10] для таких сложных и чрезвычайно опасных объектов, как ядерные энергетические установки), появляется возможность более объективного оценивания показателей долговечности СФСС в соответствии с современными достижениями теории необратимых процессов динамических систем [8, 14–19].

### Заключение и выводы

Одно из основных свойств теории надежности, безопасности и эффективности СФСС – долговечность. Это свойство неразрывно связано как со свойством «необратимость», так и со свойством «старение». Несмотря на обилие работ в области классической физики, динамики и термодинамики, на наш взгляд, понятия «старение» и «долговечность» в инженерных науках объективно дополняют друг друга. Мы очень близки к точке зрения И. Р. Пригожина, высказанной в работе [1, с. 173], что «тела состоят из атомов, которые бессмертны во времени, а меняется лишь отношение между атомами и молекулами». В этом смысле временная шкала старения характеризует свойство популяций, которые всегда состоят из индивидов.

Из содержания статьи следуют выводы:

1. Необратимость – объективная форма существования и устойчивых флуктуирующих динамических систем и играет важную конструктивную роль в процессах даже в совершенно различных областях науки, начиная с биологии и заканчивая космологией.
2. Необратимые процессы имеют свои закономерности на трех уровнях описания систем: субмикроскопическом, микроскопическом и макроскопическом. В конечном итоге такие микроскопические процессы, как химические реакции, диффузия, адсорбция, распад твердых растворов, изменение механических, электрических и магнитных свойств твердых тел и другие, являются причиной более сложных деградационных макропроцессов: коррозия, эрозия, износ, ползучесть, усталость, деформации и др. Причем такого рода необратимые процессы развиваются под воздействием комплекса эксплуатационных факторов в СФСС: динамические и статические механические нагрузки, термогидравлические и тепловые удары, перенос и осаждение продуктов коррозии, примесей и т.д. Поэтому необратимые процессы приводят к глубоким изменениям на самом фундаментальном уровне описания природы – на уровне пространственно-временного континуума.
3. Энтропийное время всегда направлено в одну сторону и не совпадает с ходом времени, отсчитываемого по обычным часам, и поэтому всегда эволюционирует в модусах «прошлое–настоящее–будущее», причем существует множество типов эволюции времени.
4. С точки зрения решения динамических задач на статистическом уровне с помощью функции распределения состояния систем  $p$  исследование должно включать прежде всего спектральное представление операторов: эволюции Лиувилля, микроскопической энтропии, преобразования, внутреннего времени.
5. Важным вопросом является описание непрерывных во времени функций распределения, связанных с незатухающими взаимодействиями, что приводит к появлению сингулярных функций. А это свидетельствует о выходе исследования из гильбертова пространства с «хорошими» функциями и переходе к обобщенным пространствам типа пространства Гельфанда.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 18-47-860007, 18-07-00391).*

### Библиографический список

1. Пригожин, И. Р. От существующего к возникающему: время и сложность в физических науках : пер. с англ. / И. Р. Пригожин ; под ред., с предисл. и послесл. Ю. Л. Климонтовича. – Изд. 2-е, доп. – Москва : Едиториал УРСС, 2002. – 288 с.
2. Пригожин, И. Время, хаос, квант. К решению парадокса времени : пер. с англ. / И. Пригожин, И. Стенгерс. – Изд. 5-е. – Москва : Едиториал УРСС, 2003. – 240 с.

3. Пригожин, И. Конец неопределенности. Время, хаос и новые законы природы / И. Пригожин. – Ижевск : Ижевская республиканская типография, 1999. – 216 с.
4. Больцман, Л. Избранные труды / Л. Больцман. – Москва : Наука, 1984.
5. Ньютон, И. Математические начала натуральной философии // В кн.: Крылов А. Н. Собрание трудов. Т. 7. – Москва – Ленинград : Изд-во АН СССР, 1936.
6. Храмов, Ю. А. Клаузиус Рудольф Юлиус Эмануэль (Clausius Rudolf Julius Emanuel) // Физики : Биографический справочник / под ред. А. И. Ахиезера. – Изд. 2-е, испр. и доп. – Москва : Наука, 1983. – 400 с.
7. Острейковский, В. А. Старение и прогнозирование ресурса оборудования атомных станций / В. А. Острейковский. – Москва : Энергоатомиздат, 1994. – 288 с.
8. Острейковский, В. А. Математическое моделирование эффекта асимметрии внутреннего времени в теории долговечности структурно и функционально сложных критически важных систем / В. А. Острейковский, Е. Н. Шевченко // Итоги науки. Выпуск 37 : избр. тр. междунар. симп. по фундаментальным и прикладным проблемам науки. – Москва : РАН, 2018. – С. 69–111.
9. Острейковский, В. А. Необратимость процессов как важнейшее свойство модусов внутреннего времени сложных систем / В. А. Острейковский, Е. Н. Шевченко // Региональная информатика (РИ – 2018). XV Санкт-Петербургская международная конференция «Региональная информатика (РИ – 2018)» (Санкт-Петербург, 24–26 октября 2018 г.) : материалы конф. СПОИСУ. – Санкт-Петербург, 2018. – С. 252–254.
10. Антонов, А. В. Ресурс и срок службы оборудования энергоблоков атомных станций (на примере энергоблоков Смоленской АЭС) / В. А. Антонов, В. А. Острейковский. – Москва : Инновационное машиностроение, 2017. – 536 с.
11. Гиббс, Дж. В. Термодинамика. Статистическая механика. – Москва : Наука, 1982.
12. Terrell, L. H. Interacting enzyme systems at steady state: Location of the phase / L. H. Terrell, Chen Yi-Der // J. Chemistry Proc. Nati. Acad. Sci. USA. – 1978. – Vol. 75, № 7. – P. 3015–3018.
13. Колмогоров, А. Н. Об аналитических методах в теории вероятностей / А. Н. Колмогоров // Успехи математических наук. – 1938. – Вып. 5. – С. 5–41.
14. Острейковский, В. А. Феномен асимметрии времени в теории неустойчивых и необратимых процессов сложных динамических систем : монография / В. А. Острейковский. – Сургут : Печатный мир, 2017. – 268 с.
15. Острейковский, В. А. Операторы энтропии, преобразования и внутреннего времени в теории долговечности сложных систем / В. А. Острейковский, Е. Н. Шевченко // Фундаментальные и прикладные проблемы науки : материалы XIV Междунар. симп. – Москва : РАН, 2019. – С. 91–98.
16. Острейковский, В. А. Феномен асимметрии внутреннего времени с учетом неустойчивости и необратимости процессов в теории прогнозирования состояния сложных динамических систем / В. А. Острейковский, С. А. Лысенкова, Е. Н. Шевченко // Надежность и качество сложных систем. – 2019. – № 1 (25). – С. 3–10.
17. Острейковский, В. А. О возможности использования эффекта асимметрии времени в задачах оценки долговечности сложных технических систем / В. А. Острейковский, С. А. Лысенкова, Е. Н. Шевченко // Надежность и качество сложных систем. – 2019. – № 1. – С. 21–34.
18. Особенности разработки макромоделей надежности сложных электронных систем / Н. К. Юрков, А. В. Затылкин, С. Н. Полесский, И. А. Иванов, А. В. Лысенко // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2014. – Т. 1. – С. 101–102.
19. Лысенко, А. В. Методика проведения испытаний для определения динамических характеристик БРЭА / А. В. Лысенко, Г. В. Таньков, В. А. Трусов, И. И. Кочегаров // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2018. – Т. 2. – С. 106–108.

## References

1. Prigozhin I. R. *Ot sushchestvuyushchego k voznikayushchemu: vremya i slozhnost' v fizicheskikh naukakh: per. s angl.* [From existing to emerging: time and complexity in the physical Sciences: translated from English]. 2nd ed., rev. Moscow: Editorial URSS, 2002, 288 p. [In Russian]
2. Prigozhin I., Stengers I. *Vremya, khaos, kvant. K resheniyu paradoksa vremeni: per. s angl.* [Time, chaos, quantum. To solve the time paradox: translated from English]. 5th ed. Moscow: Editorial URSS, 2003, 240 p. [In Russian]
3. Prigozhin I. *Konets neopredelennosti. Vremya, khaos i novye zakony prirody* [End of uncertainty. Time, chaos and new laws of nature]. Izhevsk: Izhevskaya respublikanskaya tipografiya, 1999, 216 p. [In Russian]
4. Bol'tsman L. *Izbrannye trudy* [Selected works]. Moscow: Nauka, 1984. [In Russian]
5. N'yuton I. *Krylov A. N. Sbranie trudov* [Krylov A. N. Collection of works]. Vol. 7. Moscow – Leningrad: Izd-vo AN SSSR, 1936. [In Russian]
6. Khramov Yu. A. *Fiziki: Biograficheskiy spravochnik* [Physics : a Biographical dictionary]. Izd. 2nd ed., suppl. and rev. Moscow: Nauka, 1983, 400 p. [In Russian]

7. Ostreykovskiy V. A. *Starenie i prognozirovaniye resursa oborudovaniya atomnykh stantsiy* [Aging and the prediction of the service life of nuclear power plants]. Moscow: Energoatomizdat, 1994, 288 p. [In Russian]
8. Ostreykovskiy V. A., Shevchenko E. N. *Itogi nauki. Vypusk 37: izbr. tr. mezhdunar. simp. po fundamental'nyim i prikladnym problemam nauki* [Results of science. Issue 37: selected proceedings of the international Symposium on fundamental and applied problems of science]. Moscow: RAN, 2018, pp. 69–111. [In Russian]
9. Ostreykovskiy V. A., Shevchenko E. N. *Regional'naya informatika (RI – 2018). XV Sankt-Peterburgskaya mezhdunarodnaya konferentsiya «Regional'naya informatika (RI – 2018)».* Sankt-Peterburg, 24–26 oktyabrya 2018 g.: materialy konferentsii. SPOISU [Regional Informatics (RI – 2018). XV St. Petersburg international conference " Regional Informatics (RI – 2018)". Saint-Petersburg, October 24–26, 2018 : proceedings of the conference. SPOIS]. Saint-Petersburg, 2018, pp. 252–254. [In Russian]
10. Antonov A. V., Ostreykovskiy V. A. *Resurs i srok sluzhby oborudovaniya energoblokov atomnykh stantsiy (na primere energoblokov Smolenskoy AES)* [Resource and service life of equipment for nuclear power plants (on the example of Smolensk NPP power units)]. Moscow: Innovatsionnoe mashinostroenie, 2017, 536 p. [In Russian]
11. Gibbs Dzh. V. *Termodinamika. Statisticheskaya mekhanika* [Thermodynamics. Statistical mechanics]. Moscow: Nauka, 1982. [In Russian]
12. Terrell L. H., Chen Yi-Der *J. Chemistry Proc. Nati. Acad. Sci. USA.* 1978, vol. 75, no. 7, pp. 3015–3018.
13. Kolmogorov A. N. *Uspekhi matematicheskikh nauk* [Advances in mathematical sciences]. 1938, iss. 5, pp. 5–41. [In Russian]
14. Ostreykovskiy V. A. *Fenomen asimmetrii vremeni v teorii neustoychivyykh i neobratimyykh protsessov slozhnykh dinamicheskikh sistem: monografiya* [The phenomenon of time asymmetry in the theory of unstable and irreversible processes of complex dynamical systems: monograph]. Surgut: Pechatnyy mir, 2017, 268 p. [In Russian]
15. Ostreykovskiy V. A., Shevchenko E. N. *Fundamental'nye i prikladnye problemy nauki: materialy XIV Mezhdunar. simp.* [Fundamental and applied problems of science: proceedings of the XIV international Symposium]. Moscow: RAN, 2019, pp. 91–98. [In Russian]
16. Ostreykovskiy V. A., Lysenkova S. A., Shevchenko E. N. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2019, no. 1 (25), pp. 3–10. [In Russian]
17. Ostreykovskiy V. A., Lysenkova S. A., Shevchenko E. N. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2019, no. 1, pp. 21–34. [In Russian]
18. Yurkov N. K., Zatylnik A. V., Polesskiy S. N., Ivanov I. A., Lysenko A. V. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the international Symposium Reliability and Quality]. 2014, vol. 1, pp. 101–102. [In Russian]
19. Lysenko A. V., Tan'kov G. V., Trusov V. A., Kochegarov I. I. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the international Symposium Reliability and Quality]. 2018, vol. 2, pp. 106–108. [In Russian]

**Острейковский Владислав Алексеевич**

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

**Шевченко Елена Николаевна**

кандидат физико-математических наук, доцент,  
кафедра информатики и вычислительной техники,  
Сургутский государственный университет  
(Россия, г. Сургут, ул. Ленина, 1)  
E-mail: elenan\_27@mail.ru

**Ostreykovsky Vladislav Alekseevich**

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

**Shevchenko Elena Nikolaevna**

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

**Образец цитирования:**

Острейковский, В. А. Об учете свойства необратимости процессов в задачах оценки долговечности структурно и функционально сложных систем / В. А. Острейковский, Е. Н. Шевченко // Надежность и качество сложных систем. – 2020. – № 3 (31). – С. 37–45. – DOI 10.21685/2307-4205-2020-3-5.

# ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

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

УДК 519.718:519.873

DOI 10.21685/2307-4205-2020-3-6

Б. П. Зеленцов

### МОДЕЛЬ НАДЕЖНОСТИ ОБЪЕКТА ПРИ НЕДОСТОВЕРНОМ КОНТРОЛЕ

B. P. Zelentsov

### DEPENDABILITY MODEL OF AN ITEM UNDER UNRELIABLE CHECK-OUT OPERATIONS

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Приведена аналитическая модель при постоянном периоде между проверками и при недостоверном контроле технического состояния. Модель направлена на совершенствование технических систем при их проектировании и при обслуживании в процессе эксплуатации. Целью статьи является формирование такой модели. *Материалы и методы.* Модель основана на описании процессов при эксплуатации объекта с одновременным использованием марковской модели в непрерывном времени и полумарковского процесса. Модель применима для объектов и систем, в которых используется электронное оборудование. *Результаты.* Получена зависимость расчетных значений вероятностных и временных показателей надежности от периодичности проверок, интенсивности отказов и вероятностей ошибок контроля I и II рода. *Выводы.* Модель является результатом обобщения и совершенствования моделей эксплуатации технических систем, построенных на электронном оборудовании. Достоверность модели подтверждена математическими обоснованиями и представлениями о системе мониторинга технического состояния.

**Abstract.** *Background.* An analytic model of a functioning item under regular period between checks and unreliable check-out operations is represented. The model is intended for perfection of design and maintenance of technical systems. The aim of the article is forming such model. *Materials and methods.* The model is based on the theory of Markov processes in continuous time and semimarkov processes using matrix methods for mathematical operations. The model can be applied for items and systems based on electronic equipment. *Results.* Consideration of the model reveals the influence of check-out errors of the first and the second kind and other parameters on the dependability level. Relations between parameters are derived using the model. *Conclusions.* The model is the result of generalization and perfection of operation of systems based on electronic equipment. The truthfulness of the model is confirmed by mathematical argumentation and comprehension of system operation and condition monitoring.

**Ключевые слова:** надежность объекта, постоянный период между проверками, ошибки контроля I и II рода.

**Keywords:** dependability of an item, condition monitoring with regular period, check-out errors of the first and the second kind.

## Введение

Известно, что надежность объекта зависит не только от параметров отказов, но и от качества системы технического обслуживания, составной частью которой является мониторинг технического состояния, который заключается в наблюдении за объектом с целью получения информации о его техническом состоянии и рабочих параметрах. Ввиду этого исследования надежности объектов с учетом мониторинга технического состояния остаются актуальными. Моделирование мониторинга позволяет решать проблемы исследования, проектирования и совершенствования технических систем. Для этих целей используют теорию дискретных марковских процессов в непрерывном и дискретном времени. Как в нашей стране, так и за рубежом проводятся разнообразные исследования в этой области.

Мониторинг технического состояния применяется в разных областях техники с учетом специфических особенностей. Так, в области энергетики одной из основных проблем является релейная защита энергосистем, где требуется контролировать такие события, как ложное срабатывание системы мониторинга, отказ в функционировании, внутренние и внешние короткие замыкания [1, 2]. Оборудование телекоммуникационных сетей относится к системам длительного использования, в которых проводится непрерывный и периодический мониторинг различных участков сети, что позволяет установить необходимый уровень готовности сети с учетом резервирования оборудования и характеристик восстановления [3].

С системой мониторинга тесно связаны задачи по эксплуатационным испытаниям, которые являются достоверным источником получения информации об исходных характеристиках надежности [4–6]. Эти характеристики используются при построении различных моделей, реально отражающих процессы в технических системах. От рациональной организации эксплуатационных испытаний зависит достоверность получаемой информации и стоимость системы мониторинга.

В работе [7] исследовано влияние полноты, глубины и безотказности контроля при моделировании надежности резервированных систем. Разработаны модели типовых структур надежности. Результаты моделирования позволяют обоснованно выдвигать требования к характеристикам систем контроля.

В работе [8] на основе аналитических методов мониторинга составлены модели обнаружения и диагностики отказов и повреждений в сложных системах. Конкретные исследования, связанные с периодичностью профилактических мероприятий, приведены в работе [9].

Системы со встроенным контролем изучались многими авторами. Так, в работе [10] исследован контроль правильности выполнения функции в системах с восстановлением. Модель основана на теории марковских процессов в непрерывном времени, при этом переходы между состояниями описаны с помощью системы дифференциальных уравнений. В исследованиях широко используются модели на основе полумарковских процессов [11, 12]. В работе [13] приведены теория и примеры применения полумарковских процессов. Применен метод вложенных цепей Маркова, на основе которого исследованы характеристики процессов в нестационарном режиме, в частности, временные характеристики в системах массового обслуживания.

## Концептуальная модель

Мониторинг реализуется в виде операций контроля технического состояния, которые проводятся периодически. Система мониторинга заключается в том, что периодически проводятся проверки, контроль функционирования, измерения параметров и на основании этого устанавливается факт наличия отказа.

Во время эксплуатации объект используется по назначению (функционирует), подвергается разным видам технического обслуживания, в том числе проверкам технического состояния. С этой точки зрения эксплуатацию объекта можно представить состоящей из функционирования, проверок технического состояния и восстановления. С течением времени происходят переходы между этими фазами эксплуатации.

Во время функционирования объект может находиться в двух состояниях: работоспособном и неработоспособном. В неработоспособное состояние объект переходит при наступлении отказа, который обнаруживается при проверке технического состояния в рамках проведения контрольных операций. Объект используется по назначению как в работоспособном, так и в неработоспособном состоянии. Если проверке подвергается работоспособный объект, то после проверки он возвращается на функционирование. Если же проверке подвергается неработоспособный объект, то он направляется на восстановление, после которого он возвращается на функционирование.

При недостоверном контроле возможны ошибки контроля I и II рода. Если в конце периода объект окажется работоспособным, то при проверке возможна ошибка I рода, которая приводит к ложному восстановлению. Если же в конце периода объект окажется неработоспособным, то при проверке возможна ошибка II рода, которая приводит к тому, что на функционирование направляется неработоспособный объект.

В данной модели рассматриваются разные периоды, связанные с отказами объекта. Период между двумя последовательными проверками может быть:

- 1) работоспособным, если объект является работоспособным на всем периоде;
- 2) с отказом, если в течение периода происходит отказ, при этом период состоит из двух частей: работоспособной части и неработоспособной части;
- 3) неработоспособным, если объект является неработоспособным на всем периоде.

*Замечание.* Отказ на периоде не изменяет продолжительность периода.

В данной модели приняты следующие условия и допущения:

- 1) отказы происходят с постоянными интенсивностями, т.е. отказы наступают в случайный момент времени, а время до отказа распределено по показательному закону;
- 2) контроль состояния объекта производится с постоянным периодом, при этом начало каждого периода отсчитывается от начала функционирования после восстановления или очередной проверки;
- 3) при обнаружении отказа объект поступает на восстановление, после которого начинается функционирование в работоспособном состоянии.

- 4) продолжительности проведения проверок и восстановления приняты пренебрежимо малыми.

Последнее допущение принято для упрощения модели. Такое допущение позволяет оценить влияние различных факторов в «чистом виде». В частности, в соответствии с установленными нормами коэффициент готовности является вероятностью работоспособного состояния без учета планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусмотрено. В случае необходимости учесть конечное время нахождения в состояниях контроля и восстановления в рамках данной модели не составляет затруднений. Также следует отметить, что в результате выполнения последнего допущения получены простые формулы для вычисления показателей надежности.

Целью статьи является составление модели надежности объекта с постоянным периодом между проверками с учетом приведенных условий и ограничений.

### Характеристики состояний на одном периоде

На одном периоде начальным может быть как работоспособное, так и неработоспособное состояние. Если работоспособное состояние является начальным, то вероятности этих состояний в момент времени  $t \in [0; T]$  в соответствии с принятыми допущениями имеют вид

$$p_p(t) = e^{-\lambda \cdot t}; p_n(t) = 1 - e^{-\lambda \cdot t}, \quad (1)$$

где  $T$  – установленный (постоянный) период между проверками,  $\lambda$  – интенсивность отказов.

При  $t = T$  получаем вероятности работоспособного и неработоспособного состояний в конце периода при условии, что работоспособное состояние является начальным:

$$p_p = p_p(T) = e^{-\lambda \cdot T}; p_n = p_n(T) = 1 - e^{-\lambda \cdot T}. \quad (2)$$

Средние времена нахождения в этих состояниях на одном периоде при начальном работоспособном состоянии:

$$\theta_p = \int_0^T p_1(t) dt = \frac{1 - e^{-\lambda \cdot T}}{\lambda}; \theta_n = \int_0^T p_2(t) dt = \frac{\lambda \cdot T - (1 - e^{-\lambda \cdot T})}{\lambda}. \quad (3)$$

*Замечание.*  $\theta_p$  и  $\theta_n$  – это средние времена нахождения в работоспособном и неработоспособном состояниях на периоде с отказом.

Если неработоспособное состояние является начальным на периоде, то в этом случае следующий за ним период является неработоспособным:

$$\theta_p = 0; \theta_n = T. \quad (4)$$

*Замечание.* Продолжительность периода не зависит от наличия или отсутствия отказа.

### Переходы между состояниями фаз эксплуатации объекта

Диаграмма состояний приведена на рис. 1. На диаграмме обозначено:  $1P_1$  – работоспособное состояние объекта в начале периода;  $2P_2$  – работоспособное состояние объекта в конце работоспособного периода;  $3H_1$  – неработоспособное состояние объекта в конце периода с отказом;  $4H_2$  – неработоспособное состояние в конце неработоспособного периода, является результатом ошибки контроля II рода;  $5ПР$  и  $6ПН$  – проверка работоспособного и неработоспособного объекта;  $7В$  – восстановление работоспособности объекта;  $\alpha$  – вероятность ошибки контроля I рода;  $\beta$  – вероятность ошибки контроля II рода.

С вероятностью ошибки контроля I рода происходит переход  $5 \rightarrow 7$  (ложное восстановление) и с вероятностью ошибки контроля II рода происходит переход  $6 \rightarrow 4$  (необнаруженный отказ), где состояние 4 является неработоспособным, при этом неработоспособное состояние является начальным состоянием неработоспособного периода.

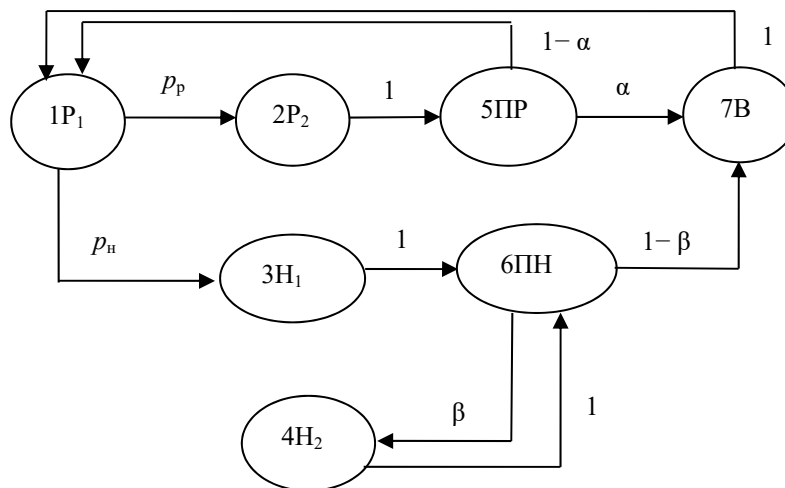


Рис. 1. Диаграмма состояний объекта

Из приведенной диаграммы видно, что работоспособное состояние является начальным после восстановления или очередной проверки работоспособного объекта. Следующий за этим период может быть работоспособным (переход  $1 \rightarrow 2$ ) или с отказом (переход  $1 \rightarrow 3$ ). Таким образом, работоспособное состояние 2 и неработоспособное состояние 3 – это состояния в конце периода.

После состояний 2 и 3 в рамках контроля технического состояния производится проверка соответственно работоспособного и неработоспособного объекта. Если объект является работоспособным, то после проверки он направляется или на функционирование, или на восстановление в результате ошибки контроля I рода. Если же проверке подвергается неработоспособный объект, то он направляется на восстановление или продолжается его использование в неработоспособном состоянии в результате ошибки контроля II рода. После восстановления объект всегда направляется на функционирование в работоспособном состоянии.

### Метод исследования

В данной модели имеют место события, происходящие в непрерывном и дискретном времени. Отказ объекта на работоспособном периоде происходит в непрерывном времени, однако переходы

$1 \rightarrow 2, 1 \rightarrow 3, 6 \rightarrow 4$  происходят в дискретном времени. Поскольку принято, что время проверки и время восстановления являются пренебрежимо малыми, то фактически происходит отражение от состояний 5, 6, 7 после попадания в них. Переходы между состояниями описаны с помощью полумарковского процесса [11–13]. Исходными характеристиками при этом являются переходные вероятности, названные вероятностями проходов. Вероятность прохода  $q_{ij}$  – это вероятность перехода из  $i$ -го состояния в  $j$ -е состояние при условии, что происходит выход из  $i$ -го состояния. Вероятности проходов приведены на диаграмме состояний. По этой диаграмме формируется матрица вероятностей проходов  $Q$ .

В данной модели применен метод относительных частот, основанный на использовании вероятностей проходов [14, 15].

Пусть  $U$  – некоторое множество несущественных состояний. В матрице вероятностей проходов на множестве  $U$ ,  $Q_{UU}$  отображены переходы только между состояниями множества  $U$ . По матрице  $Q_{UU}$  находится матрица относительных частот  $N_U$  множества  $U$ :

$$N_U = \| n_U(i, j) \| = (E - Q_{UU})^{-1}, \quad (5)$$

где  $n_U(i, j)$  – среднее число вхождений (попаданий) в  $j$ -е состояние до выхода из множества  $U$  при условии, что  $i$ -е состояние является начальным при вхождении в множество  $U$ . Элементы матрицы относительных частот названы относительными частотами состояний. Если известно начальное распределение вероятностей состояний  $q(0)$ , то относительные частоты состояний можно представить в виде строки

$$n_U = \| n_U(j) \| = q(0) \cdot N_U. \quad (6)$$

Разобьем множество состояний на два подмножества:  $U = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ ,  $V = \{7\}$ . В результате такого разбиения эксплуатацию объекта можно представить в виде последовательных переходов между этими подмножествами:  $U \rightarrow V \rightarrow U \rightarrow V \dots$ . Будем называть циклом нахождение объекта в состояниях подмножества  $U$  и следующее за ним нахождение в состояниях подмножества  $V$ . Из диаграммы рис. 1 следует, что подмножество  $U$  всегда начинается с состояния 1.

Матрицы вероятностей проходов на всем множестве состояний и на подмножестве  $U$ ,  $Q$  и  $Q_{UU}$  соответственно:

$$Q = \begin{pmatrix} 0 & p_p & p_n & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1-\alpha & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \alpha \\ 0 & 0 & 0 & \beta & 0 & 0 & 1-\beta \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}; \quad Q_{UU} = \begin{pmatrix} 0 & p_p & p_n & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1-\alpha & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \beta & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

По матрице  $Q_{UU}$  вычисляется матрица относительных частот  $N_U$  по формуле (5). Поскольку состояние 1 всегда является начальным при переходе  $V \rightarrow U$ , то средними относительными частотами состояний являются элементы первой строки матрицы  $N_U$ :

$$n_U = \| n_U(j) \| = \frac{1}{1 - (1-\alpha) \cdot p_p} \cdot \| 1 \quad p_p \quad p_n \quad \frac{\beta \cdot p_n}{1-\beta} \quad p_p \quad \frac{p_n}{1-\beta} \|. \quad (7)$$

Средние относительные частоты состояний:

$$\begin{aligned} n_U(1) &= \frac{1}{A}; \quad n_U(2) = n_U(5) = \frac{e^{-\lambda T}}{A}; \quad n_U(3) = \frac{1 - e^{-\lambda T}}{A}; \\ n_U(4) &= \frac{\beta \cdot (1 - e^{-\lambda T})}{(1-\beta) \cdot A}; \quad n_U(6) = \frac{1 - e^{-\lambda T}}{(1-\beta) \cdot A}, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $A = 1 - (1-\alpha) \cdot e^{-\lambda T}$ .

### Показатели надежности объекта

Показатели надежности будем определять через временные характеристики состояний. Среднее время нахождения в одном состоянии на одном цикле определяется произведением средней относительной частоты состояния и среднего времени нахождения в этом состоянии после попадания в него.

В рамках приведенной модели будут вычислены:

- средняя продолжительность работоспособного и неработоспособного состояний;
- среднее время цикла;
- коэффициент готовности и коэффициент неготовности.

Средние относительные частоты периодов на одном цикле:  $n_U(2)$  – среднее число работоспособных периодов;  $n_U(3)$  – среднее число периодов с отказом;  $n_U(4)$  – среднее число неработоспособных периодов. В соответствии с принятыми допущениями продолжительность каждого из этих периодов равна  $T$ . Исходя из этих представлений получаем расчетные формулы для среднего времени работоспособных и неработоспособных состояний на одном цикле  $t_p$  и  $t_n$  соответственно:

$$t_p = n_U(2) \cdot T + n_U(3) \cdot \theta_p = \frac{\lambda \cdot T \cdot e^{-\lambda T} + (1 - e^{-\lambda T})^2}{\lambda \cdot A}; \quad (9)$$

$$t_n = n_U(3) \cdot \theta_n + n_U(4) \cdot T = \frac{\lambda \cdot T - (1 - \beta) \cdot (1 - e^{-\lambda T})}{(1 - \beta) \cdot \lambda \cdot A} \cdot (1 - e^{-\lambda T}). \quad (10)$$

Сумма этих времен составляет среднее время цикла эксплуатации:

$$t_{\text{ц}} = t_p + t_n = \frac{1 - \beta \cdot e^{-\lambda T}}{(1 - \beta) \cdot A} \cdot T. \quad (11)$$

*Пояснение.* Среднее время цикла – это среднее время между восстановлениями объекта. По нему можно определить среднюю частоту восстановлений – среднее число восстановлений в единицу времени. В частном случае, при  $\beta = 0$  среднее время цикла составляет  $T/A = n_U(1) \cdot T$ , что соответствует концептуальной модели.

Коэффициент готовности  $K_r$  и коэффициент неготовности  $K_n$ :

$$K_r = \frac{t_p}{t_{\text{ц}}} = \frac{1 - \beta}{1 - \beta \cdot e^{-\lambda T}} \cdot \frac{\lambda \cdot T \cdot e^{-\lambda T} + (1 - e^{-\lambda T})^2}{\lambda \cdot T}; \quad (12)$$

$$K_n = \frac{t_n}{t_{\text{ц}}} = \frac{1 - e^{-\lambda T}}{1 - \beta \cdot e^{-\lambda T}} \cdot \frac{\lambda \cdot T - (1 - \beta) \cdot (1 - e^{-\lambda T})}{\lambda \cdot T}. \quad (13)$$

Проверка показывает, что  $K_r + K_n = 1$ .

### Результаты исследования

Введем новый параметр  $\rho = \lambda \cdot T$ , который назовем приведенной интенсивностью отказов. Приведенная интенсивность отказов – это среднее число отказов за период  $T$ . Использование одного параметра вместо двух позволяет упростить исследование. Выразим через параметр  $\rho$  показатели надежности. Соответствующие формулы приведены в табл. 1.

В табл. 2 приведены значения коэффициента неготовности в зависимости от ошибок контроля II рода при одной и той же приведенной интенсивности отказов  $\rho = 10^{-3}$ . Видно, что коэффициент неготовности существенно зависит от ошибок контроля II рода: порядок коэффициента неготовности изменяется от  $10^{-7}$  до  $10^{-3}$  при возрастании вероятности ошибок контроля II рода. Однако коэффициент неготовности не зависит от ошибок контроля I рода, так как временные характеристики ( $t_p$ ,  $t_n$ ,  $t_{\text{ц}}$ ) зависят пропорционально от вероятности ошибок контроля I рода.

Таблица 1

Показатели надежности объекта, выраженные с помощью приведенной интенсивностью отказов

| Показатель надежности                                        | Формулы для вычисления                                                                                                 |
|--------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. Среднее время цикла                                       | $t_{\text{ц}} = \frac{1-\beta \cdot e^{-\rho}}{(1-\beta) \cdot A} \cdot T$                                             |
| 2. Среднее время работоспособного состояния на одном цикле   | $t_{\text{р}} = \frac{\rho \cdot e^{-\rho} + (1-e^{-\rho})^2}{\rho \cdot A} \cdot T$                                   |
| 3. Среднее время неработоспособного состояния на одном цикле | $t_{\text{н}} = \frac{\rho - (1-\beta) \cdot (1-e^{-\rho})}{(1-\beta) \cdot \rho \cdot A} \cdot (1-e^{-\rho}) \cdot T$ |
| 4. Коэффициент готовности                                    | $K_{\text{г}} = \frac{1-\beta}{1-\beta \cdot e^{-\rho}} \cdot \frac{\rho \cdot e^{-\rho} + (1-e^{-\rho})^2}{\rho}$     |
| 5. Коэффициент неготовности                                  | $K_{\text{н}} = \frac{\rho - (1-\beta) \cdot (1-e^{-\rho})}{1-\beta \cdot e^{-\rho}} \cdot \frac{1-e^{-\rho}}{\rho}$   |

Таблица 2

Значения коэффициента неготовности при разных значениях вероятностей ошибок контроля и при  $\rho = 10^{-3}$ 

| $\beta$        | 0                 | 0,001               | 0,01              | 0,1                 | 0,2                 | 0,3                 | 0,4                 | 0,5               |
|----------------|-------------------|---------------------|-------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-------------------|
| $K_{\text{н}}$ | $5 \cdot 10^{-7}$ | $1,5 \cdot 10^{-6}$ | $1 \cdot 10^{-5}$ | $1,1 \cdot 10^{-4}$ | $2,5 \cdot 10^{-4}$ | $4,3 \cdot 10^{-4}$ | $6,7 \cdot 10^{-4}$ | $1 \cdot 10^{-3}$ |

В табл. 3 приведены значения среднего времени неработоспособного состояния, отнесенные к единице времени между проверками ( $t_{\text{н}}/T$ ). Видно, что среднее время неработоспособного состояния на одном цикле существенно зависит от ошибок контроля I и II рода. С ростом вероятности ошибок контроля II рода среднее время неработоспособного состояния существенно увеличивается (по данным таблицы на 3 порядка). Однако возрастание вероятности ошибок контроля I рода приводит к уменьшению среднего времени неработоспособного состояния ввиду того, что уменьшается время цикла или увеличивается частота восстановлений (см. диаграмму состояний объекта).

Пусть при  $\rho = 0,001$  и при заданных значениях  $\alpha$  и  $\beta$  обеспечивается определенное значение среднего времени неработоспособного состояния  $t_{\text{н}}$  на одном цикле. Если при этом  $\lambda = 0,001$  1/ч, то следует выбрать периодичность проверки  $T = 1$  ч. Если  $\lambda = 10^{-4}$  1/ч, то проверки можно проводить через каждые 10 ч. Если же  $\lambda = 0,01$  1/ч, то периодичность проверок должна быть уменьшена до 6 мин для обеспечения выбранного значения  $t_{\text{н}}$ .

Таблица 3

Значения параметра  $t_{\text{н}}/T$ 

| $\beta$<br>$\alpha$ | 0                   | 0,001               | 0,01                | 0,1                 | 0,2                 | 0,3                 | 0,4                 | 0,5                 |
|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 0                   | $5 \cdot 10^{-4}$   | $1,5 \cdot 10^{-3}$ | 0,011               | 0,112               | 0,25                | 0,43                | 0,67                | 1                   |
| 0,01                | $4,5 \cdot 10^{-5}$ | $1,4 \cdot 10^{-4}$ | $9,6 \cdot 10^{-4}$ | 0,01                | 0,02                | 0,04                | 0,06                | 0,091               |
| 0,05                | $1 \cdot 10^{-5}$   | $3 \cdot 10^{-5}$   | $2 \cdot 10^{-4}$   | $2,1 \cdot 10^{-3}$ | $5 \cdot 10^{-3}$   | $8,4 \cdot 10^{-3}$ | 0,01                | 0,02                |
| 0,1                 | $5 \cdot 10^{-6}$   | $1,5 \cdot 10^{-5}$ | $1,1 \cdot 10^{-4}$ | $1,1 \cdot 10^{-3}$ | $2,5 \cdot 10^{-3}$ | $4,3 \cdot 10^{-3}$ | $6,7 \cdot 10^{-3}$ | $9,9 \cdot 10^{-3}$ |
| 0,2                 | $2,5 \cdot 10^{-6}$ | $7,5 \cdot 10^{-6}$ | $5,3 \cdot 10^{-5}$ | $5,6 \cdot 10^{-4}$ | $1,2 \cdot 10^{-3}$ | $2,1 \cdot 10^{-3}$ | $3,3 \cdot 10^{-3}$ | $5 \cdot 10^{-3}$   |
| 0,3                 | $1,6 \cdot 10^{-6}$ | $5 \cdot 10^{-6}$   | $3,5 \cdot 10^{-5}$ | $3,7 \cdot 10^{-4}$ | $8,3 \cdot 10^{-4}$ | $1,4 \cdot 10^{-3}$ | $2,2 \cdot 10^{-3}$ | $3,3 \cdot 10^{-3}$ |
| 0,4                 | $1,2 \cdot 10^{-6}$ | $3,7 \cdot 10^{-6}$ | $2,6 \cdot 10^{-5}$ | $2,8 \cdot 10^{-4}$ | $6,3 \cdot 10^{-4}$ | $1 \cdot 10^{-3}$   | $1,7 \cdot 10^{-3}$ | $2,5 \cdot 10^{-3}$ |
| 0,5                 | $1 \cdot 10^{-6}$   | $3 \cdot 10^{-6}$   | $2,1 \cdot 10^{-5}$ | $2,3 \cdot 10^{-4}$ | $5 \cdot 10^{-4}$   | $8,6 \cdot 10^{-4}$ | $1,3 \cdot 10^{-3}$ | $2 \cdot 10^{-3}$   |

### Заключение

В заключение можно сделать выводы, свидетельствующие о новизне и полезности проведенного исследования:

1. При проектировании или при совершенствовании обслуживания сложных систем следует принимать во внимание не только коэффициенты готовности или неготовности, но и временные характеристики, связанные с надежностью. Представленная модель позволяет рассчитать и спрогнозировать такие показатели с учетом интенсивности отказов, периодичности проверок и вероятностей ошибок контроля I и II рода.

2. В статье использован параметр «приведенная интенсивность отказов», позволяющий объединить интенсивность отказов и периодичность проверок.

3. Достоинством модели является возможность ее реализации матричными методами с использованием компьютерного моделирования.

4. На основе приведенной модели получены расчетные формулы для показателей надежности и проведены иллюстративные расчеты при конкретных значениях исходных параметров.

Следует отметить, что модели надежности реальных систем являются более сложными. Эти модели могут быть построены на основе и с использованием идей приведенной модели. В частности, в этих моделях может быть учтено время восстановления, которое может быть случайным с заданным распределением или фиксированным. Для планирования объемов работ по обслуживанию эксплуатации оборудования целесообразно использовать частоту восстановления – число восстановлений в единицу времени.

### Библиографический список

1. Шалин, А. И. Надежность и диагностика релейной защиты энергосистем / А. И. Шалин. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2003. – 114 с.
2. Шнеерзон, Э. М. Цифровая релейная защита / Э. М. Шнеерзон. – Москва : Энергоатомиздат, 2007. – 549 с.
3. Егунов, М. М. Резервирование и восстановление в телекоммуникационных сетях / М. М. Егунов, В. П. Шувалов // Вестник СибГУТИ. – 2012. – № 2. – С. 3–9.
4. Зверев, Г. Я. Оценка надежности изделия в процессе эксплуатации / Г. Я. Зверев. – Москва : URSS, 2010. – 96 с.
5. Махитько, В. П. Методы оценки показателей надежности изделий по результатам испытаний и эксплуатации / В. П. Махитько, М. В. Засканов, М. В. Савин // Известия Самарского научного центра РАН. – 2011. – С. 293–299.
6. Чекмарев, Ю. В. Надежность информационных систем / Ю. В. Чекмарев. – Москва : Дик Пресс, 2012. – 252 с.
7. Лубков, Н. В. Влияние характеристик контроля на показатели надежности систем / Н. В. Лубков, И. Б. Спиридонов, А. С. Степанянц // Труды МАИ. – 2016. – Вып. 85. – С. 1–27.
8. Шайхутдинов, Д. В. Методы мониторинга и диагностики сложных технических систем на базе имитационного моделирования / Д. В. Шайхутдинов // Современные наукоемкие технологии. – 2018. – № 11, ч. 1. – С. 146–153.
9. Острейковский, В. А. Теория надежности / В. А. Острейковский. – Москва : Высш. шк., 2003. – 463 с.
10. Половко, А. М. Основы теории надежности / А. М. Половко, С. М. Гуров. – Санкт-Петербург, 2006. – 560 с.
11. Королюк, В. С. Полумарковские процессы и их приложения / В. С. Королюк, А. Ф. Турбин. – Киев : Наукова думка, 1986. – 320 с.
12. Сильвестров, Д. С. Полумарковские процессы с дискретным множеством состояний / Д. С. Сильвестров. – Москва : Сов. радио, 1980. – 272 с.
13. Ивченко, Г. И. Теория массового обслуживания / Г. И. Ивченко, В. А. Каштанов, И. Н. Коваленко. – Москва : Высш. шк., 2012. – 304 с.
14. Зеленцов, Б. П. Матричные методы моделирования однородных марковских процессов / Б. П. Зеленцов. – Palmarium Academic Publishing, 2017. – 133 с.
15. Зеленцов, Б. П. Метод относительных частот моделирования вероятностных систем / Б. П. Зеленцов // Вестник СибГУТИ. – 2017. – № 2. – С. 51–63.

### References

1. Shalin A. I. *Nadezhnost' i diagnostika releynoy zashchity energosistem* [Reliability and diagnostics of power system relay protection]. Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2003, 114 p. [In Russian]
2. Shneerzon E. M. *Tsifrovaya releynaya zashchita* [Digital relay protection]. Moscow: Energoatomizdat, 2007, 549 p. [In Russian]
3. Egunov M. M., Shuvalov V. P. *Vestnik SibGUTI* [Vestnik SibSUTI]. 2012, no. 2, pp. 3–9. [In Russian]
4. Zverev G. Ya. *Otsenka nadezhnosti izdeliya v protsesse ekspluatatsii* [Evaluation of product reliability during operation]. Moscow: URSS, 2010, 96 p. [In Russian]

5. Makhit'ko V. P., Zaskanov M. V., Savin M. V. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN* [News of the Samara scientific center of the Russian Academy of Sciences]. 2011, pp. 293–299. [In Russian]
6. Chekmarev Yu. V. *Nadezhnost' informatsionnykh sistem* [Reliability of information systems]. Moscow: Dik Press, 2012, 252 p. [In Russian]
7. Lubkov N. V., Spiridonov I. B., Stepanyants A. S. *Trudy MAI* [Works of MAI]. 2016, iss. 85, pp. 1–27. [In Russian]
8. Shaykhutdinov D. V. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii* [Modern high-tech technologies]. 2018, no. 11, part 1, pp. 146–153. [In Russian]
9. Ostreykovskiy V. A. *Teoriya nadezhnosti* [Reliability theory]. Moscow: Vyssh. shk., 2003, 463 p. [In Russian]
10. Polovko A. M., Gurov S. M. *Osnovy teorii nadezhnosti* [Fundamentals of reliability theory]. Saint-Petersburg, 2006, 560 p. [In Russian]
11. Korolyuk V. S., Turbin A. F. *Polumarkovskie protsessy i ikh prilozheniya* [Fundamentals of reliability theory]. Kiev: Naukova dumka, 1986, 320 p. [In Russian]
12. Sil'vestrov D. S. *Polumarkovskie protsessy s diskretnym mnozhestvom sostoyaniy* [Semi-Markov processes with a discrete set of states]. Moscow: Sov. radio, 1980, 272 p. [In Russian]
13. Ivchenko G. I., Kashtanov V. A., Kovalenko I. N. *Teoriya massovogo obsluzhivaniya* [Queueing theory]. Moscow: Vyssh. shk., 2012, 304 p. [In Russian]
14. Zelentsov B. P. *Matrichnye metody modelirovaniya odnorodnykh markovskikh protsessov* [Matrix methods for modeling homogeneous Markov processes]. Palmarium Academic Publishing, 2017, 133 p. [In Russian]
15. Zelentsov B. P. *Vestnik SibGUTI* [Vestnik SibSUTI]. 2017, no. 2, pp. 51–63. [In Russian]

**Зеленцов Борис Павлович**

доктор технических наук, профессор,  
кафедра высшей математики,  
Сибирский государственный университет  
телекоммуникаций и информатики  
(Россия, г. Новосибирск, ул. Кирова, 86)  
E-mail: zelentsovb@mail.ru

**Zelentsov Boris Pavlovich**

doctor of technical sciences, professor,  
sub-department of higher mathematics,  
Siberian State University  
Telecommunications and Computer Science  
(86 Kirova street, Novosibirsk, Russia)

**Образец цитирования:**

Зеленцов, Б. П. Модель надежности объекта при недостоверном контроле / Б. П. Зеленцов // Надежность и качество сложных систем. – 2020. – № 3 (31). – С. 46–54. – DOI 10.21685/2307-4205-2020-3-6.

А. В. Григорьев, И. И. Кочегаров, Н. К. Юрков, Н. С. Реута, Э. В. Лапшин

## СПОСОБ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ДВИЖУЩИХСЯ МЕХАНИЗМОВ НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ВИБРАЦИОННОГО РАЗМЫТИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ ТЕСТОВОГО ОБЪЕКТА КРУГЛОЙ ФОРМЫ

A. V. Grigor'ev, I. I. Kochegarov, N. K. Yurkov, N. S. Reuta, E. V. Lapshin

### METHOD FOR CONTROLLING THE TECHNICAL CONDITION OF MOVING MECHANISMS BASED ON STATISTICAL ANALYSIS OF VIBRATION BLURING IMAGES OF A TEST OBJECT ROUND FORM

**Аннотация.** Доказывается потребность в достоверном периодическом контроле вибрационного состояния современных сложных систем с целью обнаружения в них дефектов на возможно более ранних стадиях их развития. Приведено описание процесса износа подшипников качения и связанной с ним динамики параметров вибрационного сигнала. Проведен анализ требований стандартов к чувствительности средств вибрационного контроля. Проведен анализ установленных действующими стандартами зон вибрационного состояния и возможностей современного контрольного оборудования определять, в какой из этих зон находится контролируемая сложная техническая система. Приведено описание технической сущности предлагаемого в статье способа контроля вибрационного состояния движущихся механизмов. Приведена схема реализации этого способа. Проведен анализ литературных источников, описывающих различные аспекты анализа вибрационного размытия изображения тестового объекта круглой формы. Проведен анализ частотного диапазона контролируемого предлагаемым способом вибрационного сигнала. Обоснован прогнозируемый уровень порога чувствительности системы, реализующей предлагаемый в статье способ контроля. Приведено описание экспериментальной апробации способа. Представлен и проанализирован экспериментальный график последовательности вибрационных приращений площади изображения круглой метки. Приведено описание принципов формирования инварианта скорости изменения амплитуды вибрационного перемещения, на основе которого осуществляется выявление и оценка интенсивности, скрытой на фоне шумов тенденции изменения во времени параметров вибрации испытываемого источника.

**Ключевые слова:** движущийся механизм, подшипник качения, скрытый дефект, износ, вибрационное состояние, контроль, круглая метка, площадь изображения, математическое ожидание, среднее квадратичное отклонение, критерий Вилкоксона.

**Abstract.** The article proves the need for reliable periodic monitoring of the vibrational state of modern complex systems in order to detect defects in them at the earliest possible stages of their development. A description is given of the wear process of rolling bearings and the associated dynamics of the vibration signal parameters. An analysis of the vibration control tools currently used is shown, which shows that these tools do not support the vibration signal control of operating systems in the required frequency range and with the required sensitivity. The analysis of the vibrational state zones established by the current standards and the capabilities of modern control equipment to determine which of these zones the controlled complex technical system is located in is carried out. The description of the technical essence of the method proposed in the article for controlling the vibrational state of moving mechanisms is given. The implementation scheme of this method is given. The analysis of literary sources describing various aspects of the analysis of vibrational blur of the image of a test object of a round shape is carried out. The analysis of the frequency range controlled by the proposed method of the vibration signal. The predicted level of the sensitivity threshold of the system that implements the control method proposed in the article is substantiated. A description of the experimental testing of the method. An experimental graph of the sequence of vibrational increments of the image area of a round mark is presented and analyzed. The principles of the formation of an invariant of the rate of change of the amplitude of the vibrational displacement are described, on the basis of which the intensity of the tendency of the vibrational parameters of the source under test that is hidden against the background of noise is detected and evaluated.

**Keywords:** moving mechanism, rolling bearing, latent defect, wear, vibrational state, control, round mark, image area, mathematical expectation, standard deviation, Wilcoxon criterion.

### Введение

В процессе эксплуатации движущихся механизмов неизбежно возникают дефекты, которые незаметно развиваются и в конечном итоге приводят к отказам, в том числе и аварийным. Чтобы избежать аварийных ситуаций, необходимо осуществлять периодический контроль работающего механизма, оценивать его техническое состояние для того, чтобы выводить оборудование в ремонт не в аварийном, а в плановом порядке. При этом большое значение имеет контроль вибрационный [1]. Это объясняется тем, что такой контроль осуществляется непосредственно на работающем оборудовании без его остановки и разборки [2]. Кроме того, именно вибрационный сигнал является наиболее информативным [3]. Сравнительный анализ методов измерения параметров вибрации выполнен в статье [4].

Износ подшипника качения осуществляется следующим образом [5]. На начальной стадии износа гладкая поверхность дорожек, по которым перемещаются тела качения (шарики или ролики), становится шероховатой. По этим шероховатостям прокатываются тела качения и генерируют вибрационный сигнал частотой 40–60 кГц, который с течением времени нарастает по амплитуде.

Далее при работе подшипника на его дорожках образуются небольшие углубления. Тела качения (шарики или ролики) прокатываются по этим углублениям. В результате формируется огибающая амплитудно модулированного вибрационного сигнала. Диапазон частот этой огибающей от 1 до 5 кГц. Высокочастотные колебания при этом могут увеличиться в два раза.

С течением времени углубления, образовавшиеся на предыдущей стадии износа, увеличиваются в размере, их количество также увеличивается. Возрастает амплитуда вибрационного сигнала и глубина его модуляции.

На следующей стадии углубления сливаются друг с другом, создавая неровные следы и сколы на дорожках и телах качения подшипника. Подшипник находится в поврежденном состоянии.

Средства вибрационного контроля, которые применяются в настоящее время, не воспринимают высокочастотный вибрационный сигнал подшипников. Например, диапазон частот анализируемой вибрации виброанализатора *BALTECH VP-3470-Ex* составляет 2Гц...10кГц. Диапазон частот измеряемой вибрации лазерного виброметра *PDV-100* фирмы *Polytec GmbH* – 0...25кГц. Эти приборы начинают регистрировать вибрационный сигнал тогда, когда появляется низкочастотная огибающая. При этом важно обнаруживать вибрацию уже на той стадии, когда огибающей еще нет. Это позволило бы на более ранней стадии прогнозировать остаточный ресурс, существенно сократило бы время простоя неисправного оборудования, увеличило бы срок его службы, удешевило ремонт и техническое обслуживание.

### Обоснование требований к чувствительности средств вибрационного контроля

Для количественной оценки вибрационного состояния машин и механизмов стандарт [6] устанавливает зоны такого состояния. Контролируемый параметр вибрации нового механизма, только вводимого в эксплуатацию, должен соответствовать зоне *A*. Контролируемый параметр вибрации пригодного к эксплуатации механизма должен соответствовать зоне *B*. Нахождение контролируемого параметра вибрации в зоне *C* указывает на то, что оборудование может функционировать лишь ограниченный промежуток времени до его вывода в ремонт. Вибрация в зоне *D* – это сигнал к немедленной остановке оборудования и выводу его в ремонт.

Стандарт [6] предусматривает два критерия оценки технического состояния: по абсолютной величине контролируемого параметра и по скорости его изменения. Стандарт [7] устанавливает границы зон технического состояния для различных видов оборудования по обоим критериям. При этом второй критерий представляется более универсальным. Его стандартные показатели не зависят от типа контролируемого оборудования. Для всех типов рассматриваемого в стандарте [7] оборудования (насосы, электродвигатели, вентиляторы, компрессоры, редукторы, паропроводы) границе между зонами *B* и *C* соответствует скорость изменения вибрационного ускорения  $2,5 \text{ (м/с}^2\text{)/ч}$ , скорость изменения вибрационной скорости  $1,5 \text{ (мм/с)/ч}$ , скорость изменения вибрационного перемещения  $4 \text{ мкм/ч}$ . Для того, чтобы адекватно оценить скорость изменения реального вибрационного сигнала, следует выполнить приблизительно 100 измерений контролируемого параметра вибрации в течение одного часа. В результате для идентификации границы между зонами *B* и *C* потребуются, чтобы порог чувствительности измерительной системы по вибрационному перемещению не превышал  $0,04 \text{ мкм}$ .

### Техническая сущность способа

На рис. 1 представлена схема реализации способа контроля технического состояния движущихся механизмов на основе статистического анализа вибрационного размытия изображения тестового объекта круглой формы.

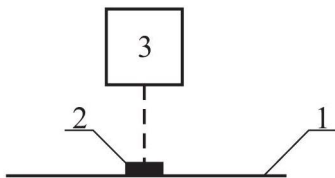


Рис. 1. Схема системы анализа размытия изображения тестового объекта круглой формы

На поверхность 1 объекта контроля или на поверхность, механически связанную с этой поверхностью, наносится тестовый объект в виде метки 2 круглой формы. Изображение этой метки фиксируется регистрирующим устройством 3, в качестве которого может быть применена, например, цифровая фотокамера. Далее обрабатывающее устройство, в качестве которого может быть применен компьютер или контроллер, подсчитывает количество пикселей цифрового изображения круглой метки и идентифицирует это количество как площадь изображения круглой метки [8]. При увеличении амплитуды вибрации растет и вибрационное размытие изображения круглой метки. Для оконтуривания области изображения круглой метки применяются методики, разработанные для обработки электронно-дифракционных картин [9–11]. Технология измерения аппликаты вибрационного перемещения на основе анализа размытия изображения круглой метки представлена в статье [12]. Принципы конфигурирования систем измерения вибрационного перемещения на основе анализа размытия изображения круглой метки изложены в статье [13]. Калибровочные измерения виброметра размытия изображения круглой метки описаны в статье [14].

Фотографирование метки повторяется определенное количество раз (например, 100) через определенный временной интервал. На основе анализа динамики полученных значений площади изображения круглой метки принимается решение о том, развивается там дефект или нет. Если амплитуда вибрационного сигнала нарастает, значит, увеличивается и площадь изображения круглой метки. А это указывает на то, что в механизме развивается дефект.

### Оценка верхней граничной частоты контролируемой вибрации и порога чувствительности системы, реализующей данный способ

Измерительным сигналом, по которому судят об интенсивности вибрационного процесса, является вибрационное приращение площади изображения круглой метки, определяемой количеством пикселей, приходящихся на изображение круглой метки. Это вибрационное приращение (которое может быть как положительным, так и отрицательным) обусловлено размытием изображения круглой метки вследствие вибрационного перемещения ее оригинала. От частоты вибрации вибрационное размытие изображения не зависит. Верхняя граничная частота вибрационного сигнала, воспринимаемого системой, – удвоенная частота излучения, в котором формируется изображение. Если в качестве такого излучения применяется видимый свет, то верхняя граничная частота лежит в области сотен терагерц.

Чувствительность системы по отношению к вибрационному перемещению определяется следующим образом. Вибрационное приращение среднего радиуса изображения круглой метки пропорционально вибрационному перемещению ее оригинала. О среднем радиусе здесь говорится потому, что в результате вибрации круглая форма нарушается. В качестве измерительного сигнала вибрационного перемещения круглой метки выбрано приращение не радиуса, а площади ее изображения. Пусть площадь изображения круглой метки при выключенном испытываемом источнике вибрации составила  $S_{im0} \text{ pix}^2$ , где  $1 \text{ pix}$  – расстояние между центрами пикселей, соседствующих между собой в строке или в столбце раstra. При включенном испытываемом источнике вибрации площадь изображения круглой метки увеличилась на величину  $\Delta S_{imt}$ , т.е.

$$S_{imt1} = S_{imt0} + \Delta_{S_{imt}}, \quad (1)$$

где  $S_{imt1}$  – площадь изображения круглой метки при включенном испытуемом источнике вибрации.

Из формулы площади круга следует, что

$$r_{imt} = \sqrt{\frac{S_{imt}}{\pi}}, \quad (2)$$

где  $r_{imt}$  – радиус изображения круглой метки, измеренный в  $pix$ ;  $S_{imt}$  – площадь изображения круглой метки, измеренная в  $pix^2$ .

Из формулы (2) следует, что

$$r_{imt0} = \sqrt{\frac{S_{imt0}}{\pi}}, \quad (3)$$

где  $r_{imt0}$  – радиус изображения круглой метки при выключенном испытуемом источнике вибрации, измеренный в  $pix$ :

$$r_{imt1} = \sqrt{\frac{S_{imt1}}{\pi}}, \quad (4)$$

где  $r_{imt1}$  – радиус изображения круглой метки при включенном испытуемом источнике вибрации, измеренный в  $pix$ .

Абсолютное вибрационное приращение радиуса изображения круглой метки  $\Delta_{rimtp}$ , выраженное в  $pix$ :

$$\Delta_{rimtp} = r_{imt1} - r_{imt0}. \quad (5)$$

Относительное вибрационное приращение радиуса изображения круглой метки  $\delta_{rimt}$ :

$$\delta_{rimt} = \frac{\Delta_{rimtp}}{r_{imt0}}. \quad (6)$$

Абсолютное вибрационное приращение радиуса изображения круглой метки  $\Delta_{rimtm}$ , выраженное в микрометрах, которое является оценкой вибрационного перемещения информативной точки – геометрического центра оригинала круглой метки:

$$\Delta_{rimtm} = r_t \delta_{rimt}, \quad (7)$$

где  $r_t$  – радиус оригинала круглой метки.

Последовательные вычисления по формулам (1), (3)–(7) показали, что если, например, радиус оригинала круглой метки  $r_t = 2$  мм, а количество пикселей, приходящихся на изображение круглой метки,  $S_{imt0} = 100000pix^2$  (что вполне доступно при применении недорогого *USB* микроскопа *DigiMicroProf*, реальная разрешающая способность которого составляет  $1Mpix$ ), то при увеличении площади изображения круглой метки на один пиксель оценка вибрационного перемещения информативной точки составит  $0,01$  мкм.

Это и есть порог чувствительности системы к вибрационному перемещению. Применение камер с более высокой разрешающей способностью позволит еще более снизить порог чувствительности системы.

### Экспериментальная апробация способа

Авторами был проведен эксперимент. На поверхность источника питания компьютера, содержащего в своем составе вентилятор размером  $80 \times 80 \times 25$  мм, была нанесена белая круглая метка на черном фоне. Источник питания до эксперимента практически не был в эксплуатации, работает бесшумно. Авторы получили сто фотографий круглой метки при выключенном испытуемом источнике вибрации (вентиляторе) и сто фотографий круглой метки при включенном испытуемом источнике вибрации. Последовательность регистрации фотографий была следующая: сначала регистри-

ровались пять фотографий при выключенном испытуемом источнике вибрации, затем пять фотографий – при включенном испытуемом источнике вибрации, после этого снова пять фотографий – при выключенном испытуемом источнике вибрации и пять фотографий – при включенном испытуемом источнике вибрации. И так до тех пор, пока не было получено сто цифровых фотографий при выключенном испытуемом источнике вибрации и сто цифровых фотографий при включенном испытуемом источнике вибрации. Формировалась последовательность вибрационных приращений площади изображения круглой метки, вычисленных по формуле

$$\Delta_{Simt}(i) = S_{imt1}(i) - S_{imt0}(i), \quad (8)$$

где  $i$  – порядковый номер результата измерения площади изображения круглой метки в серии.

Графически эта последовательность представлена на рис. 2.

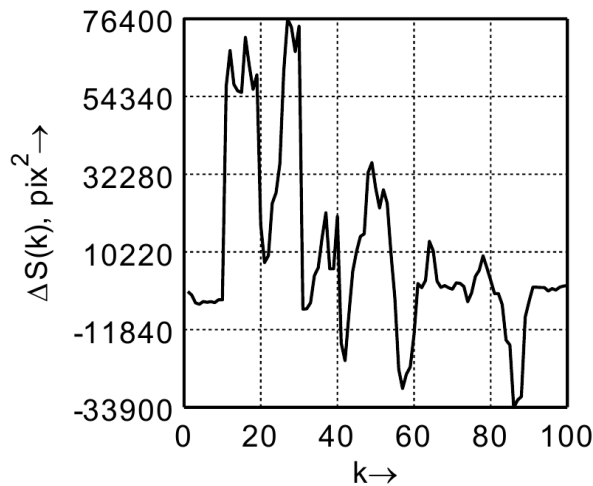


Рис. 2. Экспериментальная последовательность вибрационных приращений площади изображения круглой метки

То, что источник питания новый, и то, что работает он бесшумно, указывает на то, что шарикоподшипник вентилятора находится в начальной стадии износа. Амплитуда вибраций мала, а их частота лежит в ультразвуковом диапазоне. В экспериментальной последовательности преобладают изменения случайного характера, обусловленные большим количеством не поддающихся учету факторов.

На фоне случайных изменений прослеживается общая тенденция вибрационного приращения в сторону уменьшения. Эта тенденция объясняется тем, что измерения проводились на только что включенном источнике питания, когда вибрация снижается за счет саморазогрева вентилятора.

Для того, чтобы засечь эту тенденцию и оценить уровень ее интенсивности, необходимо сформировать статистический инвариант скорости изменения амплитуды вибрационного перемещения.

#### Формирование инварианта скорости изменения амплитуды вибрационного перемещения

На первом шаге формирования инварианта амплитуды вибрационного перемещения вычисляются разности между каждым из приращений  $\Delta_{Simt}(i)$  полученной выборки и всеми последующими ее приращениями:

$$d(k) = \Delta_{Simt}(i) - \Delta_{Simt}(j), \quad (9)$$

где  $i$  и  $j$  – порядковые номера экспериментальных значений вибрационного приращения в выборке значений  $\Delta_{Simt}(i)$  при выполнении условия  $j > i$ ;  $k$  – порядковый номер значения разности  $d$ .

Если выборка  $\Delta_{Simt}$  абсолютно случайная, то сумма отрицательных значений  $d(k)$  приблизительно равна сумме положительных значений  $d(k)$ . Если на фоне случайных изменений прослежива-

ется отрицательный или положительный тренд, то сумма отрицательных или положительных значений  $d(k)$ , соответственно, будет преобладать. Для того, чтобы количественно оценить величину этого преобладания, предлагается вычислить расчетное значение критерия Вилкоксона  $T_{pe}$  [15] по выборке значений разности  $d(k)$ . Объем выборки  $n$  значений разности  $d$  связан с объемом выборки  $n_s$  значений приращения  $\Delta_{Simt}$  формулой

$$n = \frac{n_s(n_s - 1)}{2}. \quad (10)$$

Если  $n \geq 10$ , то закон распределения расчетного значения критерия Вилкоксона  $T_{pe}$  можно считать нормальным, независимо от того, по какому закону распределена исходная выборка значений  $\Delta_{Simt}(i)$ . Параметры этого распределения:

$$M(T_{pe}) = \frac{n(n+1)}{4}, \quad (11)$$

$$\sigma(T_{pe}) = \sqrt{\frac{n(n+1)(2n+1)}{24}}, \quad (12)$$

где  $M(T_{pe})$  и  $\sigma(T_{pe})$  – соответственно математическое ожидание и среднеквадратичное отклонение нормально распределенной случайной величины: экспериментальный критерий Вилкоксона [15].

На основе полученного экспериментального значения критерия Вилкоксона формируется статистический инвариант скорости изменения интенсивности вибрации испытуемого источника:

$$Z_T = \frac{T_{pe} - M(T_{pe})}{\sigma(T_{pe})}. \quad (13)$$

Полученное значение  $Z_T$  не зависит от объема выборки  $n$ . Закон распределения величины  $Z_T$  – стандартное нормальное распределение с математическим ожиданием, равным нулю и со среднеквадратичным отклонением, равным единице. Если, например, экспериментально полученное  $Z_T$  превышает значение  $u_{0,95}$  – квантиля стандартного нормального распределения при доверительной вероятности 0,95, то можно с доверительной вероятностью более 0,95 утверждать, что обнаружен положительный тренд вибрации. Экспериментальным путем могут быть установлены пороговые уровни  $Z_T$ , соответствующие границам зон  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и  $D$  вибрационного состояния в соответствии с работой [7].

### Заключение

Обоснована актуальность вибрационного контроля движущихся механизмов, имеющих в своем составе подшипники качения. Приведено описание процесса износа подшипника качения. Обоснована потребность в создании средств контроля, обнаруживающих износ подшипника качения на более ранней его стадии, чем его обнаруживают средства контроля, применяемые в настоящее время. На основе анализа стандартов сформулированы требования к порогу чувствительности средств вибрационного контроля технического состояния движущихся механизмов. Приведены и обоснованы оценки верхней граничной частоты контролируемой вибрации и порога чувствительности системы, реализующей предлагаемый способ. Приведено описание экспериментальных исследований, подтверждающих реализуемость и эффективность представленного в статье способа контроля технического состояния движущихся механизмов. Приведено описание процесса формирования инварианта скорости изменения амплитуды вибрационного перемещения.

### Библиографический список

1. Test station for fibre-optic pressure sensor of reflection type / T. Brostilova, S. Brostilov, N. Yurkov, V. Bannov, A. Grigoriev // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science : proceedings of the 13th International Conference on TCSET. – 2016. – P. 333–335. – DOI 10.1109/TCSET.2016.7452050.
2. Киселев, Ю. В. Вибрационная диагностика систем и конструкций авиационной техники / Ю. В. Киселев. – Самара : СГАУ, 2010.

3. Зрюмов, Е. А. Теоретическое и экспериментальное исследование структуры изображения вибрирующего тест-объекта, полученного с помощью ПЗС-фотоприемника видеокамеры / Е. А. Зрюмов, В. С. Падалко, П. А. Зрюмов, С. П. Пронин // Измерение, контроль, информатизация : материалы XVI Междунар. науч.-техн. конф. – Барнаул, 2015. – С. 93–97.
4. Сравнительный анализ методов измерения параметров вибрации / П. А. Боков, А. В. Григорьев, В. А. Трусов, В. Я. Баннов, И. Ю. Наумова // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2019. – Т. 1. – С. 200–202.
5. Бойкин, С. Четыре стадии развития дефекта в подшипнике качения / С. Бойкин. – URL: <http://blog.vibroexpert.ru/?p=348> (дата обращения: 06.06.2020).
6. ГОСТ ISO 10816-3-2002. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. – Москва : Стандартинформ, 2007.
7. ГОСТ 32106-2013. Контроль состояния и диагностика машин. Мониторинг оборудования опасных производств. Вибрация центробежных насосных и компрессорных агрегатов. – Москва : Стандартинформ, 2019.
8. Пат. RU 2032218 Устройство для селекции изображений объектов / А. Л. Држевецкий, В. Н. Кантишев, А. В. Григорьев, А. Г. Царев. – Оpubл. 27.03.1995, Бюл. № 24-2000.
9. Григорьев, А. В. Информационно-измерительная система для контроля микроструктуры и фазового состава тонкопленочных материалов : дис. ... канд. техн. наук / Григорьев А. В. – Пенза, 1999.
10. Оконтуривание склона электронно-дифракционного рефлекса / А. В. Григорьев, И. Д. Граб, Н. А. Паксяев, В. А. Трусов, В. Я. Баннов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2008. – Т. 1. – С. 332–334.
11. Принцип негативно-контурной классификации растровых элементов полутоновых изображений / А. В. Григорьев, А. Л. Држевецкий, В. Я. Баннов, В. А. Трусов, А. С. Кособоков // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2014. – Т. 2. – С. 21–24.
12. Технология измерения аппликаты вибрационного перемещения на основе анализа размытия изображения круглой метки / А. В. Григорьев, И. И. Кочегаров, А. В. Лысенко, А. С. Подсякин, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2019. – № 1 (25). – С. 45–53.
13. Принципы конфигурирования систем измерения вибрационного перемещения на основе анализа размытия изображения круглой метки / А. В. Григорьев, А. В. Лысенко, С. А. Бростилов, Э. В. Лапшин, М. Ю. Михеев // Надежность и качество сложных систем. – 2019. – № 4 (28). – С. 78–86.
14. Калибровочные измерения виброметра размытия изображения круглой метки на ее размытом изображении / А. В. Григорьев, Н. К. Юрков, А. В. Лысенко, В. А. Трусов, П. Г. Андреев // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2019. – Т. 1. – С. 208–211.
15. Кобзарь, А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников / А. И. Кобзарь. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 816 с.

## References

1. Brosttilova T., Brosttilov S., Yurkov N., Bannov V., Grigoriev A. *Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science: proceedings of the 13th International Conference on TCSET*. 2016, pp. 333–335. DOI 10.1109/TCSET.2016. 7452050.
2. Kiselev Yu. V. *Vibratsionnaya diagnostika sistem i konstruksiy aviatsionnoy tekhniki* [Vibration diagnostics of aircraft systems and structures]. Samara: SGAU, 2010. [In Russian]
3. Zryumov E. A., Padalko V. S., Zryumov P. A., Pronin S. P. *Izmerenie, kontrol', informatizatsiya: materialy XVI Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Measurement, control, Informatization: proceedings of the XVI international scientific and technical conference]. Barnaul, 2015, pp. 93–97. [In Russian]
4. Bokov P. A., Grigor'ev A. V., Trusov V. A., Bannov V. Ya., Naumova I. Yu. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2019, vol. 1, pp. 200–202. [In Russian]
5. Boykin S. *Chetyre stadii razvitiya defekta v podshipnike kacheniya* [Four stages of development of a defect in a rolling bearing]. Available at: <http://blog.vibroexpert.ru/?p=348> (accessed Jun. 06, 2020). [In Russian]
6. GOST ISO 10816-3-2002. *Vibratsiya. Kontrol' sostoyaniya mashin po rezul'tatam izmereniy vibratsii na nev-rashchayushchikhsya chastyakh* [GOST ISO 10816-3-2002. Vibration. Monitoring the condition of machines based on the results of vibration measurements on non-rotating parts]. Moscow: Standartinform, 2007. [In Russian]
7. GOST 32106-2013. *Kontrol' sostoyaniya i diagnostika mashin. Monitoring oborudovaniya opasnykh proizvodstv. Vibratsiya tsentrobezhnykh nasosnykh i kompressornykh agregatov* [GOST 32106-2013. Condition monitoring and diagnostics of machines. Monitoring of equipment of hazardous production facilities. Vibration of centrifugal pumping and compressor units]. Moscow: Standartinform, 2019. [In Russian]

8. Pat. RU 2032218 *Ustroystvo dlya selektsii izobrazheniy ob"ektov* [Device for selecting images of objects]. A. L. Drzhevetskiy, V. N. Kontishev, A. V. Grigor'ev, A. G. Tsarev. Publ. 27.03.1995, bull. no. 24-2000. [In Russian]
9. Grigor'ev A. V. *Informatsionno-izmeritel'naya sistema dlya kontrolya mikrostruktury i fazovogo sostava tonkoplenochnykh materialov: dis. kand. tekhn. nauk* [Information and measurement system for monitoring the microstructure and phase composition of thin-film materials: dis. ... cand. tech. sciences']. Penza, 1999. [In Russian]
10. Grigor'ev A. V., Grab I. D., Paksyaev N. A., Trusov V. A., Bannov V. Ya. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2008, vol. 1, pp. 332–334. [In Russian]
11. Grigor'ev A. V., Drzhevetskiy A. L., Bannov V. Ya., Trusov V. A., Kosobokov A. S. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2014, vol. 2, pp. 21–24. [In Russian]
12. Grigor'ev A. V., Kochegarov I. I., Lysenko A. V., Podsyakin A. S., Yurkov N. K. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2019, no. 1 (25), pp. 45–53. [In Russian]
13. Grigor'ev A. V., Lysenko A. V., Brostilov S. A., Lapshin E. V., Mikheev M. Yu. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2019, no. 4 (28), pp. 78–86. [In Russian]
14. Grigor'ev A. V., Yurkov N. K., Lysenko A. V., Trusov V. A., Andreev P. G. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2019, vol. 1, pp. 208–211. [In Russian]
15. Kobzar' A. I. *Prikladnaya matematicheskaya statistika. Dlya inzhenerov i nauchnykh rabotnikov* [Applied mathematical statistics. For engineers and researchers]. Moscow: FIZMATLIT, 2006, 816 p. [In Russian]

**Григорьев Алексей Валерьевич**

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

**Кочегаров Игорь Иванович**

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

**Юрков Николай Кондратьевич**

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

**Реута Никита Сергеевич**

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

**Grigoriev Alexey Valeryevich**

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

**Kochegarov Igor' Ivanovich**

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

**Yurkov Nikolay Kondratievich**

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

**Reuta Nikita Sergeevich**

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

**Лапшин Эдуард Владимирович**

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

**Lapshin Eduard Vladimirovich**

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

---

**Образец цитирования:**

Способ контроля технического состояния движущихся механизмов на основе статистического анализа вибрационного размытия изображения тестового объекта круглой формы / А. В. Григорьев, И. И. Кочегаров, Н. К. Юрков, Н. С. Реута, Э. В. Лапшин // Надежность и качество сложных систем. – 2020. – № 3 (31). – С. 55–63. – DOI 10.21685/2307-4205-2020-3-7.

N. K. Yurkov, A. A. Proshin, N. V. Goryachev

## SYNTHESIS OF THE STRUCTURE OF A MULTI-CHANNEL DATA-MEASUREMENT SYSTEM

Н. К. Юрков, А. А. Прошин, Н. В. Горячев

## СИНТЕЗ СТРУКТУРЫ МНОГОКАНАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

**Abstract.** The paper considers an approach to synthesizing the structure of a multi-channel data-measurement system. The information and measurement system is a complete metrological product and is designed to receive measurement information from primary temperature transmitters operating on different physical principles. The four channels of the data-measurement system have a contact and non-contact method for measuring temperature. A method for synthesizing the structure of measuring channels of the system is proposed. The General essence of the proposed approach is to consistently select the elements of the measuring channel of the system, taking into account the requirements of the field of operation, metrological requirements, as well as design and technological requirements. Thus, the resulting structural model of the data-measurement system meets the basic requirements, such as multi – channel measurement of a physical quantity-temperature, direct communication with the measured object, automatic control and processing of measurement information. An information model of the system is proposed that allows evaluating the nature of the information process when measuring several homogeneous physical quantities in a multi-channel data-measurement system.

**Keywords:** data-measurement system, model, structure, measuring channel, temperature, synthesis method.

**Аннотация.** Рассматривается подход к синтезу структуры многоканальной информационно-измерительной системы. Информационно-измерительная система представляет собой законченное метрологическое изделие и предназначена для получения измерительной информации от первичных измерительных преобразователей температуры, работающих на разных физических принципах. В четырех каналах информационно-измерительной системы реализованы контактный и бесконтактный способ измерения температуры. Предложена методика синтеза структуры измерительных каналов системы. Общая суть предложенного подхода заключается в последовательном выборе элементов измерительного канала системы с учетом требований области эксплуатации, метрологических требований, а также конструкторско-технологических требований. Таким образом, получаемая структурная модель информационно-измерительной системы отвечает основным требованиям, таким как многоканальное измерение физической величины – температуры, непосредственная связь с измеряемым объектом, автоматическое управление и обработка измерительной информации. Предложена информационная модель системы, позволяющая провести оценку характера информационного процесса при измерении нескольких однородных физических величин в многоканальной информационно-измерительной системе.

**Ключевые слова:** информационно-измерительная система, модель, структура, измерительный канал, температура, методика синтеза.

### Introduction. Problem statement

New scientific and technical tasks in the field of design and technological design also set new goals in the field of creating measuring instruments. Thus, by increasing the accuracy of measurements, increasing the number of functions performed and the productivity of measurement operations, a new level of measurement technology is achieved. In modern conditions, for many measurements carried out during design and technological design, not just measuring devices are needed, but full-fledged data-measurement systems. One of these tasks is to measure the temperature in various nodes of the designed radio-electronic equipment. As the design practice proves, it is extremely inefficient to use simple temperature meters – ana-

log or digital thermometers-in a real device. In conditions when it is necessary to take a complete picture of the thermal field both on the surface of the device and inside, and at the same time repeat the experiment many times under different boundary and initial conditions, a deep automation of the measurement process is required.

The use of a data-measurement system makes it possible to solve this problem as efficiently as possible. A modern data-measurement system that meets the requirements of the methodology for building data-measurement and control systems is a prominent representative of complex technical systems. This is proved by the fact that any data-measurement system is nothing more than a symbiosis of measurement tools and a set of technical tools, the combination of which provides a solution to a specific measurement problem [1]. At the same time, the integration of all components of the data-measurement system should be carried out according to the system principle, i.e. all components of the data-measurement system should have constructive and functional autonomy. The latter is provided by the presence of a computing device in the data-measurement system. Taking into account this characteristic feature of the data-measurement system, we will proceed to the development of its structural scheme.

### Research aim and problems

Based on the methodology for building data and measurement systems, develop a block diagram and information model of a multi-channel data-measurement system designed to measure temperature in both contact and non-contact ways.

### Development of a block diagram and information models

The methodology for constructing a data-measurement system implies that the main purpose of an arbitrary data-measurement systems is to receive from the object and deliver to the consumer the necessary amount of information with a given accuracy and level of adequacy, i.e. with specified and controlled quality indicators [1]. The analysis has shown that the modern data-measurement systems can be represented as a set of tools, including hardware and software, mathematical and metrological support (fig. 1).

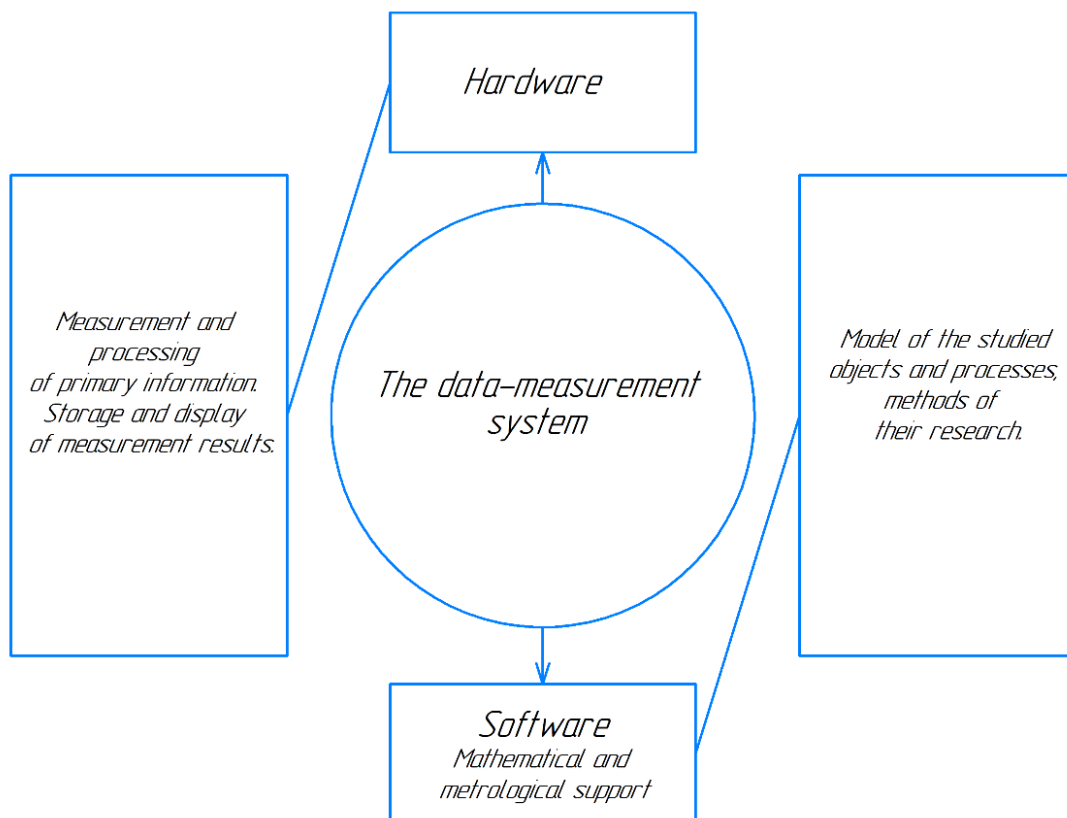


Fig. 1. Simplified data-measurement system composition

Hardware and software use primary measuring transducers to measure the desired parameter. Then the measurement results are processed, stored, and displayed. The software is designed to monitor the operation of hardware subsystems.

The basic structure for the system under development is the model of the data-measurement system proposed in [2].

The model presents only subsystems that perform separate independent functions. The source of messages is the object under study and primary measuring transducers that form an analog electrical signal  $\lambda(t)$ . This signal is called a message. The message representation subsystem provides temporary channel separation (time sampling), then each discrete value is quantized by its level and encoded. The discrete value is called the message coordinate, and their sequence from different measurement channels is combined into a common stream, i.e. it is grouped for subsequent transmission. The message transmission subsystem provides noise-tolerant encoding and message delivery to the subsystem where digital processing is performed.

Abnormal values of measurement results, primarily associated with distortions of the highest bits of the code word, as well as the time and address parts of words when transmitting compressed data, are rejected in the digital processing subsystem. This subsystem is responsible for restoring the original signal with an acceptable error, as well as for calculating the desired characteristics of the message and object.

Mathematical and metrological support, using models of the studied objects and processes based on algorithms for their research, allows you to determine the desired parameters with a given accuracy.

Simplified, the block diagram of the data-measurement system looks as shown in the fig. 2.

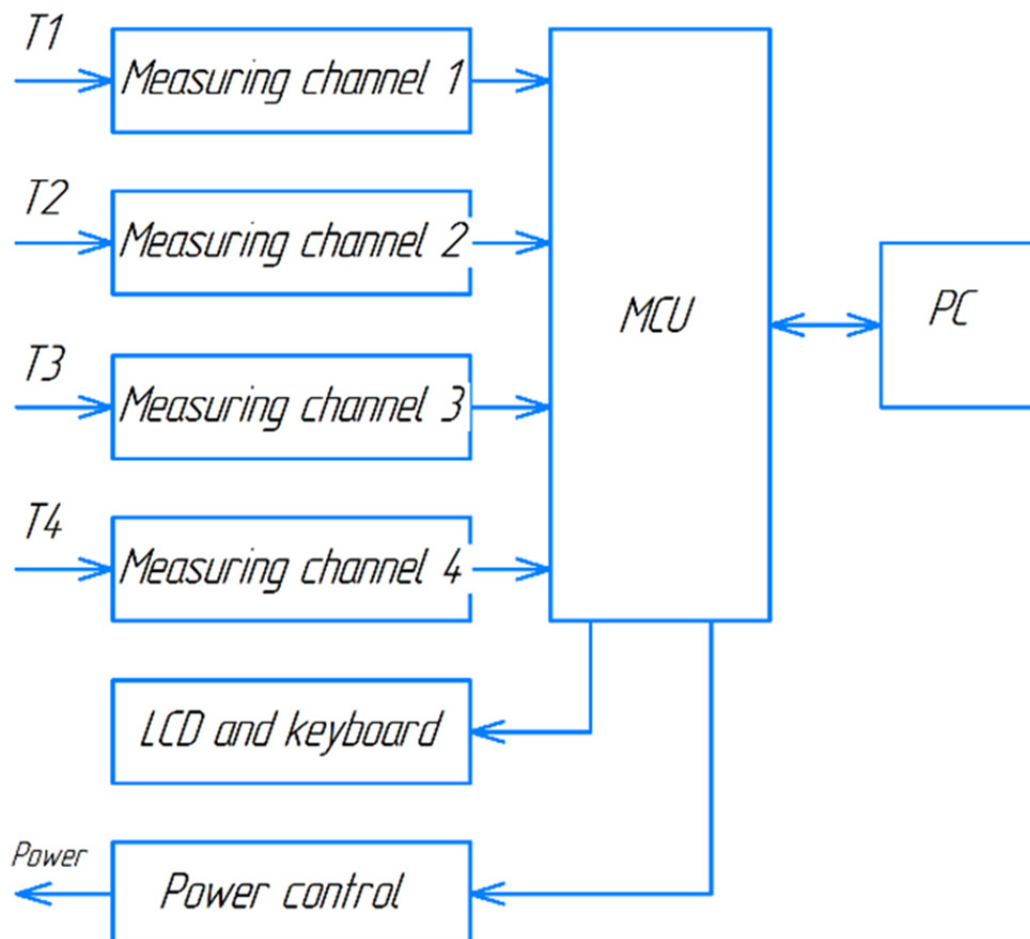


Fig. 2. The simplified diagram of the multi-channel measuring system

By enlarging the generalized scheme of an information and measurement system designed for measuring temperature both by contact and non-contact methods, we distinguish its components in more detail. As a result, we get the structure of the multi-channel data-measuring system shown in fig. 3.

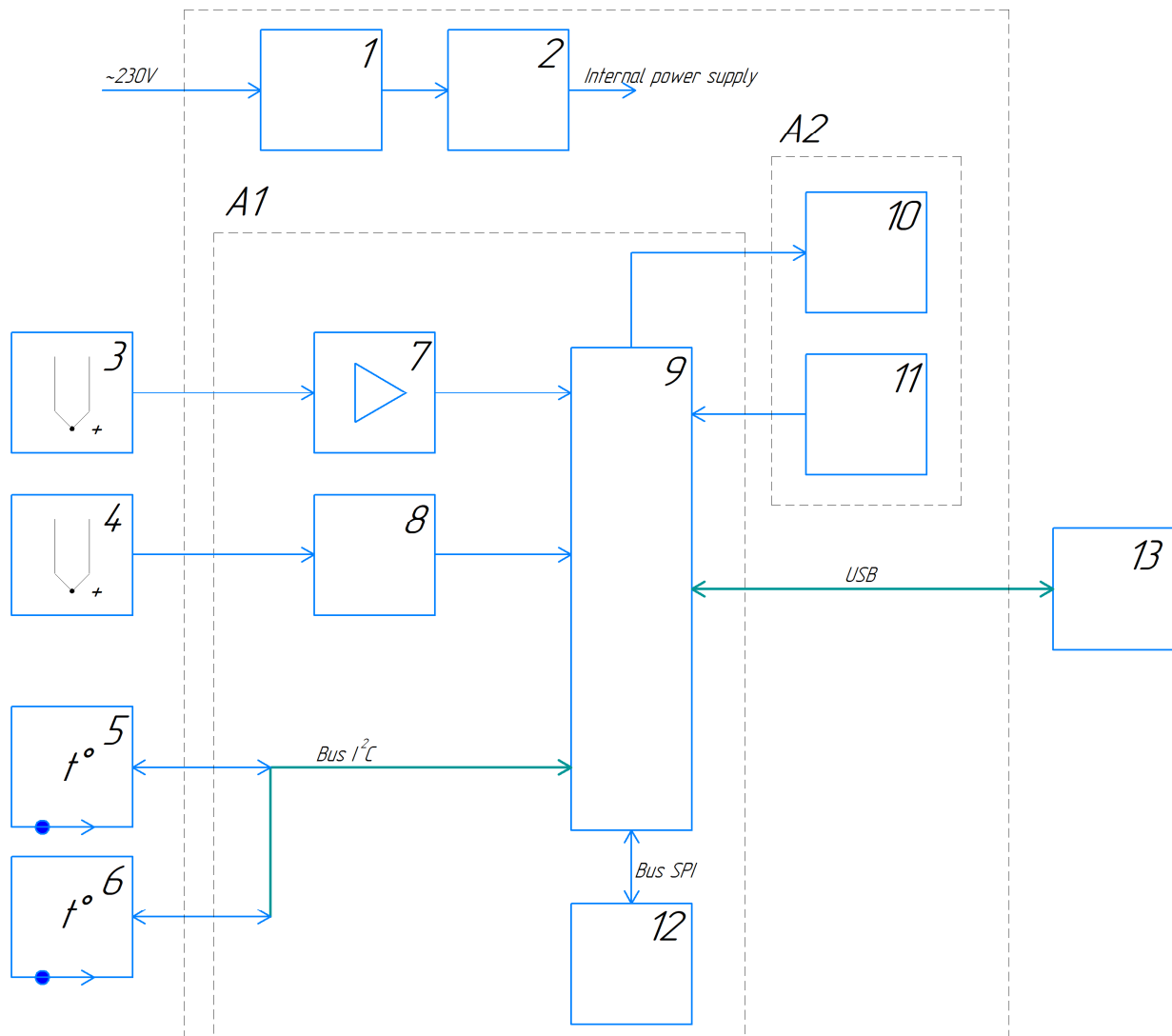


Fig. 3. Enlarged block diagram:

1 – AC/DC converter; 2 – DC power supply; 3 – analog thermocouple; 4 – digital contact temperature sensor; 5, 6 – contactless temperature meters; 7 – thermocouple signal Amplifier; 8 – digital interface; 9 – central computing device; 10 – indicator device; 11 – keyboard; 12 – non-volatile memory device; 13 – PC

All the above components of the information and measurement system are divided into two functional modules. Measurement functions and functions for processing measurement information are assigned to module A1 (data collection and processing module). Local control and display the operation mode of the information and measurement system is provided by the blocks included in the A2 module (local control and display module).

As a result of further decomposition of the structure of the information and measurement system, we obtain a more detailed structural diagram of the designed system (fig. 4).

This detail allows you to more clearly assess the functional features of the designed system and, later, during the implementation of the system, go to the solution of fundamental, circuit issues. Block 1 is a switch or multiplexer (MUX1) that switches data about the object's temperature field from two contactless temperature meters based on a microcontroller (MCU) signal. Only one-meter signal is present at the MUX1 output at any given time. Block two converts data about the temperature field of the object, taking into account the resolution, into a digital code, which is fed to block 9. the Latter is a switchable signal delay line with the ability to adjust the delay time.

Block 6 converts the thermo EMF of the thermocouple to a voltage  $\Delta U$  for further amplification. This voltage is amplified by a specialized amplifier with an adjustable gain-block 8. Then the voltage increased to the desired level passes another conversion-sampling in an analog-to-digital converter (block 10).

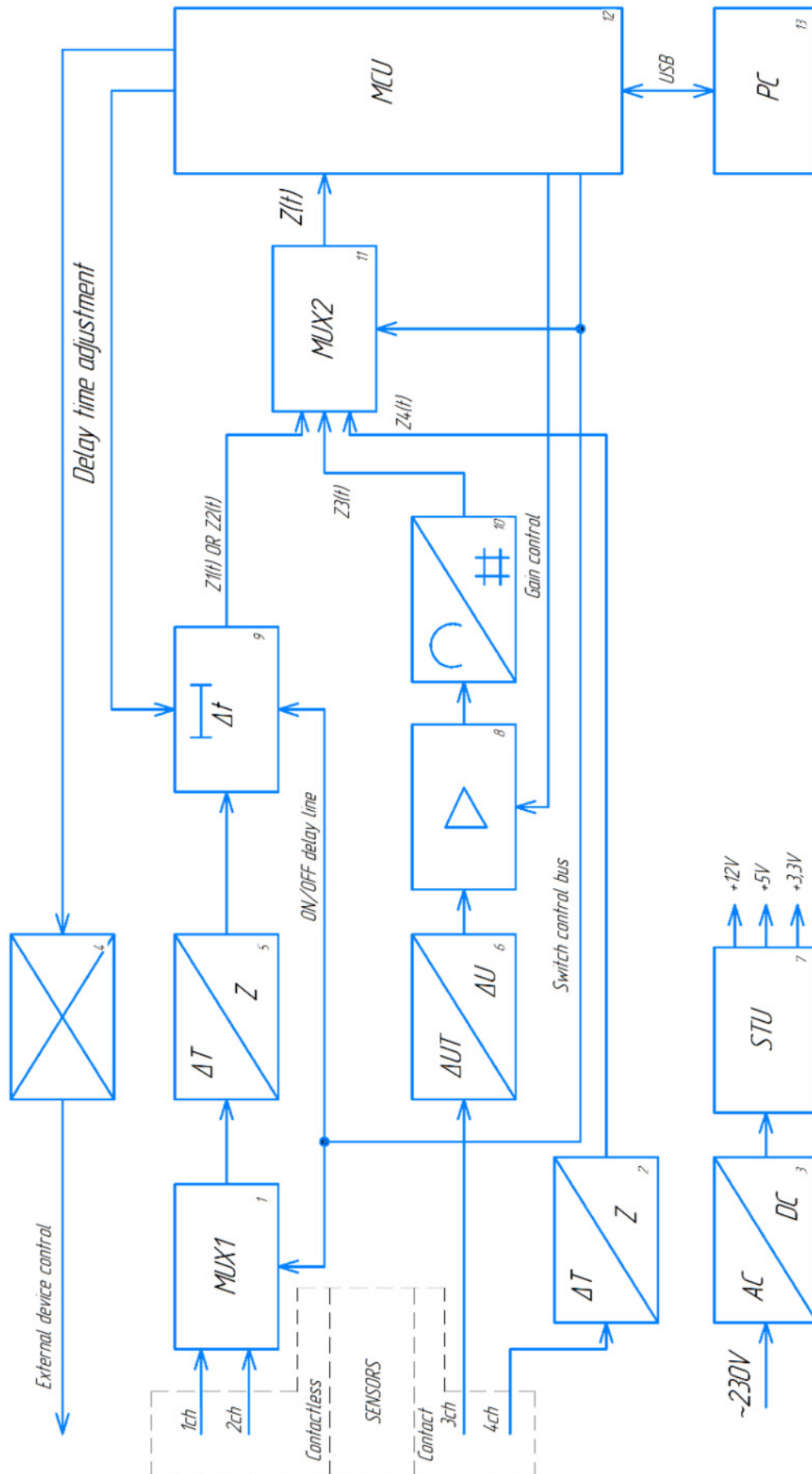


Fig. 4. The diagram of the multi-channel measuring system

Block 7 performs direct conversion of the temperature  $\Delta T$  of the object under study, obtained by contact method, to the digital code  $Z$ . This code is sent to the switch OR MUX2 multiplexer-block 11. The remaining two MUX2 inputs are fed a digital code from one of the contactless temperature meters and a digitized thermocouple temperature value. Synchronization of MUX1 and MUX2 is provided by the MCU so that each of the four measurement channels is polled 20 times per second. This creates a complete picture of the temperature distribution of the object under study.

Block 4 is an executive device designed to control the state of the object under study.

Based on the obtained block diagram of a multi-channel data-measurement system, we will develop its information model. Based on the main measurement goals set out in [3], the developed system allows finding the temperature values of the object under study by direct measurements. In this case, the information model for measuring independent input values of temperature has the form:

$$Z = \{[Z_1], [Z_2], [Z_3], [Z_4]\},$$

where  $Z_1$  – the temperature value obtained during non-contact measurement in the first measuring channel;  $Z_2$  – the temperature value obtained by non-contact measurement in the second measuring channel;  $Z_3$  – the temperature value obtained by contact measurement in the third measuring channel;  $Z_4$  – the temperature value obtained by contact measurement in the fourth measuring channel.

If it is not possible to measure the temperature separately, for example, the object under study has a relatively small size or the shape of the object surface does not allow independent measurements, the model becomes:

$$Z_G = (Z_{q1}, Z_{q2}, Z_{q3}, Z_{q4}).$$

The block diagram also allows you to study thermal processes in dynamics, such as the heating rate, cooling rate, etc. In this case, the model looks like:

$$Z(t) = Z_1(t_1), Z_2(t_2), Z_3(t_3), Z_4(t_4),$$

the condition must be met:

$$t_1 = t_2 = t_3 = t_4.$$

It follows from the condition that all measurement channels must be synchronized. Taking into account the inertia of temperature processes [4], [5], this problem requires a separate circuit solution.

Thus, the complete information model for the developed block diagram has the form:

$$\left\{ \begin{array}{l} Z = \{[Z_1], [Z_2], [Z_3], [Z_4]\}, \\ Z_G = (Z_{q1}, Z_{q2}, Z_{q3}, Z_{q4}), \\ Z(t) = Z_1(t_1), Z_2(t_2), Z_3(t_3), Z_4(t_4). \end{array} \right\}.$$

### Conclusion

Simulation modeling of the developed structural scheme showed the adequacy of the obtained data on the state of the temperature field of the object under study. Analysis of the simulation results and their comparison with known developments [6], [7] and [8] that are similar in purpose, but have a number of functional disadvantages, proves the advantages of the developed structural scheme. Meanwhile, it should be noted that when implementing the proposed structure, one of the most difficult tasks is to synchronize the survey of information channels, which will require the use of a sufficiently fast computing device. Thus, the developed block diagram of the data-measurement system meets the basic requirements, such as multi-channel measurement of a physical quantity-temperature, direct communication with the measured object, automatic control and processing of measurement information. An information model of the system is proposed that allows evaluating the nature of the information process when measuring several homogeneous physical quantities in a multi-channel data-measurement system.

### Acknowledgment

The reported study was funded by RFBR, project number 19-38-90089.

### Библиографический список

1. Рубичев, Н. А. Измерительные информационные системы : учеб. пособие / Н. А. Рубичев. – Москва : Дрофа, 2010. – 334 с.
2. Новоселов, О. Н. Основы теории и расчета информационно-измерительных систем / О. Н. Новоселов, А. Ф. Фомин. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Машиностроение, 1991. – 336 с.
3. Цапенко, М. П. Измерительные информационные системы: структуры и алгоритмы, системотехническое проектирование : учеб. пособие для вузов / М. П. Цапенко. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Энергоатомиздат, 1985.
4. Дульнев, Г. Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре : учебник для вузов / Г. Н. Дульнев. – Москва : Высш. шк., 1984. – 247 с.
5. Instrument Design for Digital Thermal Conductivity Measurement / W. Zheng, L. Feng, B. Liu, P. Fu, H. Yin, J. Qiao // IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC). – Auckland, New Zealand, 2019. – P. 1–5. – DOI 10.1109/I2MTC.2019.8827026.
6. Korkmaz, H. A thermal expansion measurement system using a high-temperature unguided half-bridge displacement transducer / H. Korkmaz, B. Can // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2005. – Vol. 54, № 5. – P. 1984–1988. – DOI 10.1109/TIM.2005.853564.
7. Korkmaz, H. Real-time thermal expansion measurement system and the data acquisition and control application software – user interface / H. Korkmaz, B. Can // IEEE International Symposium on Virtual Environments, Human-Computer Interfaces and Measurement Systems (VECIMS '03). – Lugano, 2003. – P. 45–50. – DOI 10.1109/VECIMS.2003.1227028.
8. Harris, T. R. Thermal raman and IR measurement of heterogeneous integration stacks / T. R. Harris et al. // 15th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm). – Las Vegas, NV, 2016. – P. 1505–1510. – DOI 10.1109/ITHERM.2016.7517727.

### References

1. Rubichev N. A. *Izmeritel'nye informatsionnye sistemy: ucheb. posobie* [Measuring information systems: a textbook]. Moscow: Drofa, 2010, 334 p. [In Russian]
2. Novoselov O. N., Fomin A. F. *Osnovy teorii i rascheta informatsionno-izmeritel'nykh sistem* [Fundamentals of the theory and calculation of information and measurement systems]. 2nd ed., rev and suppl. Moscow: Mashinostroenie, 1991, 336 p. [In Russian]
3. Tsapenko M. P. *Izmeritel'nye informatsionnye sistemy: struktury i algoritmy, sistemotekhnicheskoe proektirovanie: ucheb. posobie dlya vuzov* [Measuring information systems: structures and algorithms, system engineering design: textbook for universities]. 2nd ed., rev. and suppl. Moscow: Energoatomizdat, 1985. [In Russian]
4. Dul'nev G. N. *Teplo- i massoobmen v radioelektronnoy apparature: uchebnik dlya vuzov* [Heat and mass transfer in radio-electronic equipment: textbook for universities]. Moscow: Vyssh. shk., 1984, 247 p. [In Russian]
5. Zheng W., Feng L., Liu B., Fu P., Yin H., Qiao J. *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*. Auckland, New Zealand, 2019, pp. 1–5. DOI 10.1109/I2MTC.2019.8827026.
6. Korkmaz H., Can B. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2005, vol. 54, no. 5, pp. 1984–1988. DOI 10.1109/TIM.2005.853564.
7. Korkmaz H., Can B. *IEEE International Symposium on Virtual Environments, Human-Computer Interfaces and Measurement Systems (VECIMS '03)*. Lugano, 2003, pp. 45–50. DOI 10.1109/VECIMS.2003.1227028.
8. Harris T. R. et al. *15th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm)*. Las Vegas, NV, 2016, pp. 1505–1510. DOI 10.1109/ITHERM.2016.7517727.

#### Юрков Николай Кондратьевич

доктор технических наук, профессор,  
заслуженный деятель науки РФ,  
заведующий кафедрой конструирования  
и производства радиоаппаратуры,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

#### Yurkov Nikolay Kondratievich

doctor of technical sciences, professor,  
the honoured worker of science  
of the Russian Federation,  
head of sub-department of radio equipment design and  
production,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)  
E-mail: yurkov\_NK@mail.ru

**Прошин Алексей Анатольевич**

аспирант, инженер,  
кафедра конструирования  
и производства радиоаппаратуры,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

**Горячев Николай Владимирович**

кандидат технических наук, доцент,  
кафедра конструирования  
и производства радиоаппаратуры,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

**Proshin Alexey Anatolevich**

postgraduate student, engineer,  
sub-department of radio equipment design  
and production,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)  
E-mail: engineer.psu@yandex.ru

**Goryachev Nikolay Vladimirovich**

candidate of technical sciences, associate professor,  
sub-department of radio equipment design  
and production,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)  
E-mail: ra4foc@yandex.ru

---

**Образец цитирования:**

Yurkov, N. K. Synthesis of the structure of a multi-channel data-measurement system / N. K. Yurkov, A. A. Proshin, N. V. Goryachev // Надежность и качество сложных систем. – 2020. – № 3 (31). – С. 64–71. – DOI 10.21685/2307-4205-2020-3-8.

# ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ

## TECHNOLOGICAL BASIS FOR IMPROVING RELIABILITY AND PRODUCT QUALITY

УДК 004.838.2

DOI 10.21685/2307-4205-2020-3-9

А. И. Иванов, И. А. Кубасов, А. М. Самокутыев

### ТЕСТИРОВАНИЕ БОЛЬШИХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ НА МАЛЫХ ВЫБОРКАХ

A. I. Ivanov, I. A. Kubasov, A. M. Samokutyaev

### TESTING LARGE NEURAL NETWORKS ON SMALL SAMPLES

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Исследованы проблемы тестирования нейронных сетей, применяемых в интересах повышения надежности и качества сложных технических систем. Выявлены условия, при которых возможно оперативное и корректное тестирование качества принимаемых решений большими нейронными сетями на малых выборках. *Материалы и методы.* Выполнена оценка вероятности ошибок первого рода (ошибочного отказа от признания образа «Свой») на основе тестирования без сокращения тестовой выборки. Показано, что для нейросетевых решений в форме бинарного кода оценка вероятности ошибок второго рода (ошибочное принятие образа «Чужой») может быть осуществлена при значительном сокращении объема тестовой выборки. *Результаты и выводы.* Выявлено логарифмическое снижение объема тестовой выборки при переходе от статистического анализа обычных кодов к статистическому анализу расстояний Хэмминга между кодом образа «Свой» и кодами образов «Чужой». Представлена математическая модель вычисления вероятностей ошибок второго рода доверенного нейросетевого приложения на малых выборках. Обоснована необходимость дальнейшей стандартизации доверенных приложений искусственного интеллекта, позволяющих повысить надежность и качество сложных технических систем.

**Abstract.** *Background.* The paper investigated the problems of testing neural networks used to improve the reliability and quality of complex technical systems. The conditions under which rapid and correct testing of the quality of decisions made by large neural networks on small samples is possible have been revealed. *Materials and methods.* The probability of errors of the first kind (erroneous rejection of recognition of the "Own" image) was estimated based on testing without reducing the test sample. It has been shown that for neural network solutions in the form of a binary code, the probability of errors of the second kind (erroneous adoption of the "Alien" image) can be estimated with a significant reduction in the volume of the test sample. *Results and conclusions.* A logarithmic decrease in the volume of the test sample was revealed when moving from statistical analysis of ordinary codes to statistical analysis of Hamming distances between the image code "Own" and the image codes "Alien." The mathematical model of calculation of probabilities of errors of the second kind of trusted neural network application on small samples is presented. The need for further standardization of trusted applications of artificial intelligence is justified, allowing to increase the reliability and quality of complex technical systems.

**Ключевые слова:** искусственный интеллект, нейронные сети, доверенные нейросетевые приложения, объем тестовой выборки.

**Keywords:** artificial intelligence, neural networks, trusted neural network applications, test sample size.

## Введение

В соответствии с Указом Президента РФ В. В. Путина № 480 от 10 октября 2019 г. «О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации» в период с 2020 по 2030 г. выделяются значительные материальные ресурсы на развитие этой технологической ветви. При этом к искусственному интеллекту, применяемому в интересах повышения надежности и качества сложных технических систем, должны предъявляться особые требования. По аналогии с вычислениями, выполняемыми в доверенной вычислительной среде, следует выделять и доверенный искусственный интеллект. Если приложение искусственного интеллекта создано в интересах повышения надежности и качества ведомственных сложных технических систем, то обучать и тестировать достигнутое качество принимаемых решений должны сотрудники данного ведомства. Это коренное отличие ведомственных доверенных приложений искусственного интеллекта.

Еще важнейшими характеристиками являются продолжительность обучения доверенного искусственного интеллекта и продолжительность его тестирования. Скорость обучения, как правило, связана с объемом обучающей выборки. Так, современные алгоритмы глубокого обучения сверточных нейронных сетей требуют миллионы образов, размеченных «в ручную», и огромных затрат вычислительных ресурсов [1]. Дополнительно при тестировании сетей глубокого обучения также требуются огромные тестовые базы, сформированные уже без ручной разметки.

Читая зарубежную литературу по искусственному интеллекту, может создаться впечатление, что чем «умнее» и «многослойнее» сеть искусственных нейронов, тем сложнее ее обучение и тестирование. Это, действительно, было так для нейросетевых решений прошлого века. Глубокие нейронные сети и алгоритм их обучения придумал наш соотечественник А. И. Галушкин, а англичанин Джеффри Хинтон уже в 2006 г. слегка «доработал» обучение первых слов нейронных сетей.

Авторы данной статьи уверены в том, что нейросетевые решения прошлого века не совсем подходят для разработки нейросетевых доверенных вычислений. Для этой цели выгоднее применять архитектуру нейронных сетей, созданную в соответствии с требованиями пакета отечественных национальных стандартов ГОСТ Р 52633.xx-20xx. Причина такой уверенности проста: современные архитектуры нейронных сетей удается быстро и автоматически обучать, а также тестировать качество работы на малых выборках – всего 20 примеров. Следовательно, отпадает необходимость использования миллионов примеров, предварительно размеченных «вручную». Все инструменты управления нейросетевым искусственным интеллектом при использовании современных архитектур оказываются в руках владельца искусственного интеллекта. При этом формирование тестовой и обучающей выборки вполне по силам одному человеку-эксперту.

В данной статье исследованы условия, при которых возможно оперативное и корректное тестирование качества принимаемых решений доверенными нейронными сетями на малых выборках, и представлено математическое описание данной процедуры.

## Оценка уровней доверия к человеку-эксперту и нейросетевым решениям искусственного интеллекта

В настоящее время экспертиза надежности и качества сложных технических систем строится, в основном, на выводах людей-экспертов. Доверие к результатам экспертизы опирается на ряд факторов, таких как: уровень образования эксперта, наличие у эксперта аппаратно-программных средств, опыт эксперта, доверие к методике проведения той или иной экспертизы. Люди-эксперты в силу своей природы не могут выполнять большие объемы работ в очень короткие сроки. Все эти проблемы могут быть ослаблены, если создать приложения искусственного интеллекта под решение той или иной конкретной задачи.

Заметим также, что человек-эксперт не может дать достоверную вероятностную оценку ошибок принятого им решения. В этом отношении приложения искусственного интеллекта оказываются в более выгодном положении. Каждое нейросетевое решение, обученное алгоритмом

ГОСТ Р 52633.5 [2], удается быстро и автоматически тестировать как на больших, так и на малых тестовых выборках.

Для примера рассмотрим частный случай проведения почерковедческой экспертизы. Для тестирования уровня доверия к решениям конкретного эксперта формально можно сформировать, например, 10 000 тестовых заданий, заранее зная верный результат. Однако на практике столкнемся с проблемой низкой производительности «ручного» сложного труда эксперта. Проведение «ручной» почерковедческой экспертизы нескольких слов записки или одного автографа под документом может занимать десятки часов рабочего времени эксперта, т.е. на выполнение этих заданий может потребоваться несколько лет работы квалифицированного эксперта, что нерационально.

Рациональный путь решения проблемы найден. Для использования в учебном процессе российских учебных заведений создан свободно распространяемый программный продукт «БиоНейро-Автограф» [3], который позволяет видеть 416 биометрических параметров динамики воспроизведения конкретного рукописного слова [4].

### Классическое решение задач распознавания образов

Как показывают результаты исследования, стандартное отклонение большинства из 416 биометрических параметров оказывается примерно в три раза меньше, чем стандартное отклонение всех биометрических параметров всего словаря образов «Чужой». Эта ситуация отображена на рис. 1.

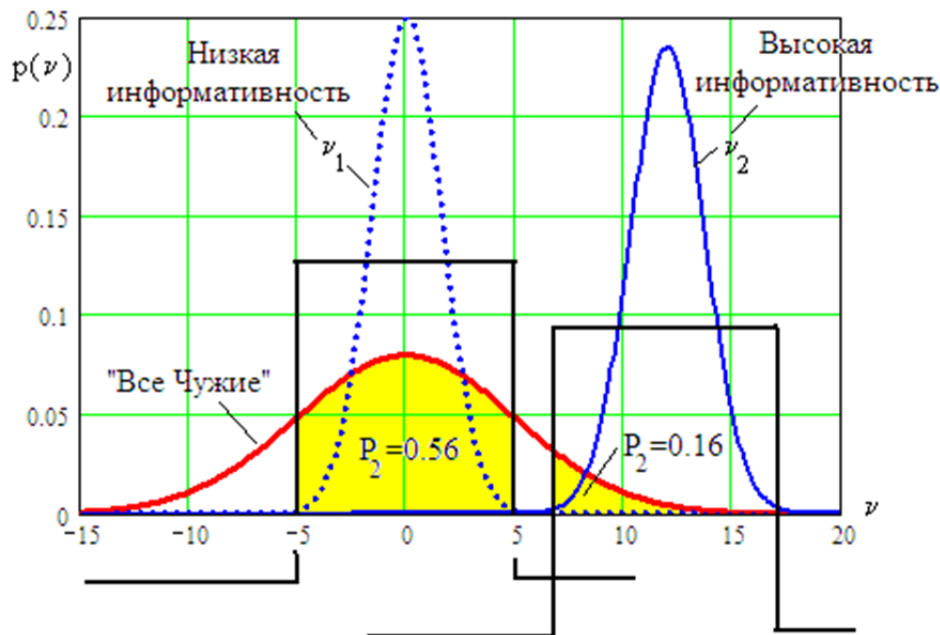


Рис. 1. Функции плотностей распределения значений двух биометрических параметров с низкой и высокой информативностью

Как видно из рис. 1, биометрические параметры могут быть выделены простым решающим правилом. Всегда можно вычислить математическое ожидание  $i$ -го биометрического параметра  $E(v_i)$  и его стандартное отклонение  $\sigma(v_i)$ . Если гипотеза нормального распределения биометрических параметров верна, то интервал  $\pm 3\sigma(v_i)$  вокруг математического ожидания должен покрывать состояния биометрического параметра с вероятностью 0.997. То есть попадание 416 параметров образа «Все Чужие» в 416 их допустимые интервалы  $\{E(v_i) \pm 3\sigma(v_i)\}$  с высокой вероятностью свидетельствует об обнаружении образа «Все Чужие» (вероятность ошибок второго рода  $P_2 \approx 0,003$  для каждого биометрического параметра). При этом вероятность ошибок второго рода  $P_2$  будет зависеть от положения математического ожидания биометрического параметра. Самая высокая вероятность ошибок второго рода будет наблюдаться у биометрических параметров с математическим ожиданием в центре распределения данных «Все Чужие». Чем больше математическое ожидание биометрического параметра удалено от центра данных «Все Чужие», тем меньше оказывается вероятность ошибки

второго рода. Учитывая это, можно оценить информативность биометрических параметров, логарифмируя вероятности ошибок второго рода:

$$I(v_i) = -\log_2(P_2(v_i)), \quad (1)$$

где  $I(v_i)$  – показатель информативности биометрического параметра  $v_i$ , вычисляемый как энтропия по Шеннону для алфавита из двух символов «0» и «1».

Из рис. 2 видно, что из 416 биометрических параметров 336 обладают низкой информативностью (менее одного бита), а только 80 биометрических параметров обладают приемлемой информативностью (более одного бита).

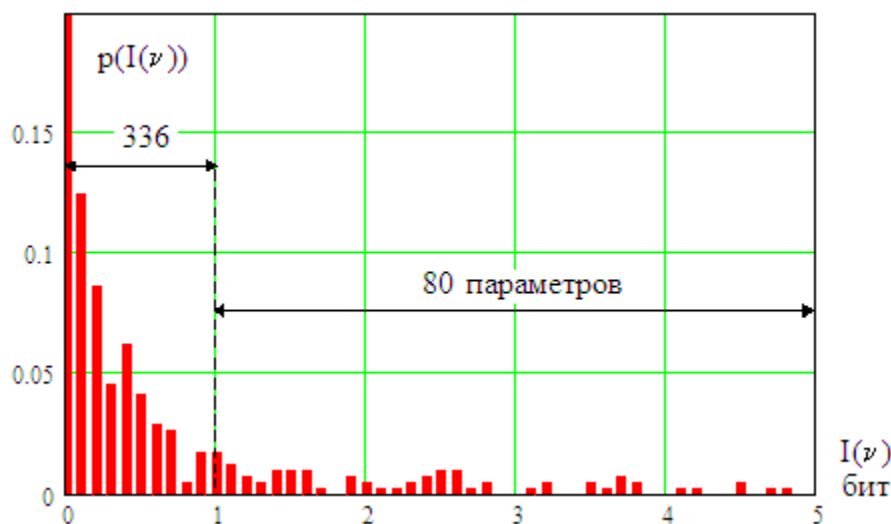


Рис. 2. Пример плотности распределения информативности 416 биометрических параметров динамики воспроизведения рукописного образа подписи

Если пользоваться парадигмой прошлого века, то следует отсечь бритвой Оккама<sup>1</sup> 336 биометрических параметров с низкой информативностью и работать только с 80 биометрическими параметрами приемлемой информативности. Эти 80 информативных биометрических параметров можно преобразовать в 80-битный криптографический ключ. Однако разряды такого ключа будут очень чувствительны к нестабильности примеров биометрического образа. По данным численного эксперимента, проведенного в среде моделирования «БиоНейроАвтограф» [3], каждый пример рукописного образа подписи будет давать примерно 16 % ошибок в разрядах 80-битного ключа.

Обнаружить и исправить 16 % ошибок можно за счет применения кодов с 20-кратной избыточностью [5]. В итоге получим криптографический ключ длиной  $80/20 = 4$  бита. Усечение криптографического ключа бритвой Оккама с 416 до 80 бит и последующее 20-кратное сжатие его длины до 4 бит представляет собой слабую технологию, так называемую «нечетких экстракторов» [6].

Следует заметить, что использование Россией технологии «нечетких экстракторов» будет означать неспособность защитить персональные биометрические данные своих граждан.

### **Отказ «нечетких экстракторов» в пользу применения отечественных сетей, состоящих из большого числа искусственных нейронов**

Отечественные криптографические стандарты (на шифрование, проверку и формирование цифровой подписи) используют ключи длиной 256 бит (а не 4 бита). В связи с этим в среде моделирования «БиоНейроАвтограф» реализована сеть из 256 искусственных нейронов, каждый из которых обучен преобразовывать 24 входных биометрических параметров образа «Свой» в один бит

<sup>1</sup> Уильям Оккам – средневековый английский монах-философ, сформулировавший принцип: «Не следует преумножать число сущностей сверх необходимого». Этот принцип в XX в. использовался как базовый многочисленными сторонниками поиска малого числа наиболее информативных параметров и «отсечения» всех остальных, менее информативных параметров.

криптографического ключа. Обучение нейросети выполняется автоматом, реализующим алгоритм ГОСТ Р 52633.5 [2]. Во время обучения вычисляются весовые коэффициенты сумматоров нейронов, осуществляющих обогащение «сырых» биометрических данных. Благодаря обучению на 20 примерах образа «Свой» на выходах сумматоров каждого нейрона информативность обогащенных данных значительно увеличивается.

Эффект нейросетевого «обогащения» биометрических данных позволяет получать верный 256-битный код криптографического ключа с вероятностью близкой к 0,95 ( $P_1 \approx 0,95$ ) при обучении нейросети на 20 примерах образа «Свой». Чем больше примеров образа «Свой» использовано при обучении нейронной сети, тем ниже оказывается вероятность ошибок первого рода. В первом приближении можно считать связь вероятности ошибок первого рода обратно пропорциональной размеру обучающей выборки, если не выполнялось дополнительное тестирование на выборке, не участвовавшей в обучении.

Если есть возможность выполнить тестирование на ограниченной тестовой выборке примеров образа «Свой», то оценка вероятности ошибок первого рода вычисляется следующим образом:

$$\begin{cases} P_1 \approx \frac{n}{N} & \text{при } n \neq 0; \\ P_1 \approx \frac{1}{N+1} & \text{при } n = 0, \end{cases} \quad (2)$$

где  $n$  – число обнаруженных ошибок;  $N$  – объем тестовой выборки.

Вторая формула системы (2) построена, исходя из предположения, что следующий опыт малой выборки может обнаружить одну ошибку. Для малых выборок такая гипотеза достаточно хорошо работает.

#### Оценка вероятности ошибок второго рода на больших тестовых выборках

Описанный выше отказ от процедур учета только малого числа наиболее информативных параметров и переход к нейросетевому статистическому анализу большинства контролируемых биометрических параметров позволяет получить выходной код длиной 265 бит.

Так, если создать базу из 100 миллионов уникальных образов подписей граждан РФ, обучить нейросеть на одном образе «Свой» и подавать на ее входы случайные образы, то будем получать случайные отклики нейросети в виде случайных выходных кодов. Обученная на образе «Свой» нейросеть будет выдавать один и тот же код, если подавать на ее входы примеры образа «Свой» из тестовой выборки, несмотря на наличие в них значительных вариаций. Нейросеть обучена учитывать естественные вариации биометрических параметров образа «Свой», представленные 20 примерами обучающей выборки. Далее при последующей эксплуатации обученная нейросеть выполняет функцию, обратную функции хэширования. Она почти устраняет влияние естественной нестабильности примеров рукописного образа «Свой». Для примеров образа «Чужой» нейросеть выполняет хэширование биометрических кодов, значительно усиливая естественную нестабильность непрерывных данных примеров образа «Чужой». Кроме того, выходной код нейросети всегда дискретен, т.е. должен иметь  $2^{256}$  спектральных линии с очень малыми значениями амплитуды вероятности их появления.

Формально можно попытаться оценить вероятность ошибок второго рода обученной нейронной сети, подставляя поочередно на ее входы  $10^8$  (100 миллионов) образов «Все Чужие». Далее для оценок следует применить формулу похожую на формулу (2):

$$\begin{cases} P_2 \approx \frac{n}{N} & \text{при } n \neq 0; \\ P_2 \approx \frac{1}{N+1} & \text{при } n = 0. \end{cases} \quad (2a)$$

К сожалению, этот методически понятный подход полного перебора большой базы тестовых образов «Чужой» с достаточно высокой вероятностью дает значительную ошибку. Ее появление обусловлено тем, что число выходных состояний нейросети –  $2^{256}$  много больше, чем размер тестовых

вой базы образов «Чужой» (создать тестовую базу из  $2^{256}$  образов «Чужой» технически невозможно, да и в этом нет необходимости). При высокой стабильности и высокой уникальности автографов будем всегда сталкиваться с ситуацией отсутствия в большой тестовой базе данных, дающих точное повторение кода «Свой».

### Оценка вероятности ошибок второго рода на малых тестовых выборках

Решить проблему тестирования на малых выборках удастся, воспользовавшись рекомендациями ГОСТ Р 52633.3 [7]. Этот национальный стандарт рекомендует отказаться от попыток статистического анализа длинных выходных кодов обученной нейросети. Для упрощения задачи необходимо перейти в пространство расстояний Хэмминга между кодом «Чужой» и кодом «Свой»:

$$h = \sum_{i=1}^{256} x_i \oplus c_i, \quad (3)$$

где  $\oplus$  – логическая операция сложения по модулю два;  $x_i$  – значение  $i$ -го разряда двоичного кода образа «Чужой»;  $c_i$  – значение  $i$ -го разряда двоичного кода образа «Свой».

Блок-схема тестирования на малых выборках приводится на рис. 3.

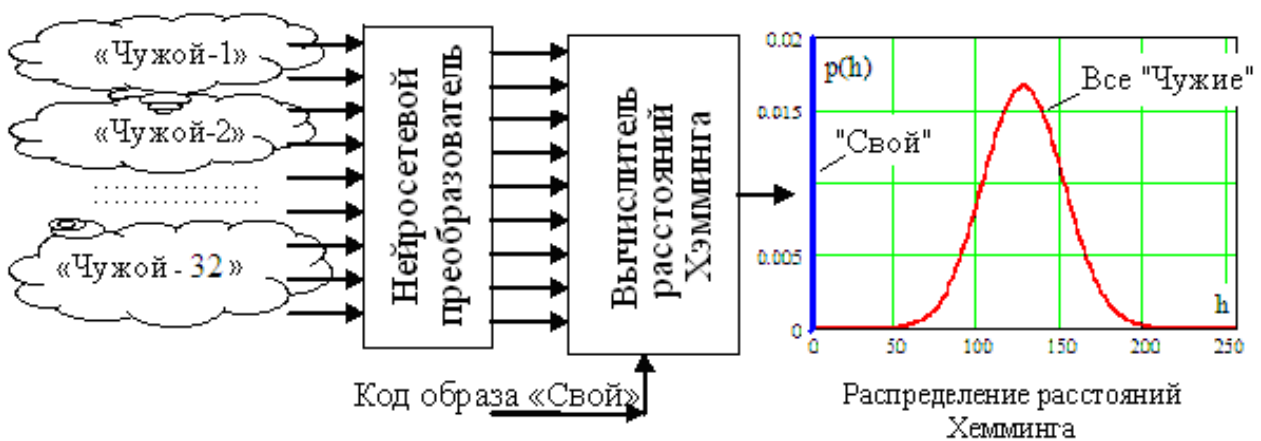


Рис. 3. Блок-схема тестирования на малых выборках в пространстве расстояний Хэмминга

Преимуществом перехода к расстояниям Хэмминга является то, что  $2^{256}$  состояний выходных кодов сжимаются до 257 состояний:  $h = \{0, 1, \dots, 256\}$ . Кроме того, распределение расстояний Хэмминга нормализуется по основной теореме статистики из-за 256-кратного суммирования случайных величин при вычислении расстояний Хэмминга (3).

Опираясь на эти обстоятельства, национальный стандарт [7] рекомендует на малой выборке вычислить математическое ожидание расстояний Хэмминга –  $E(h)$  и его стандартное отклонение  $\sigma(h)$ . Далее в рамках гипотезы нормального закона распределения следует выполнить следующие вычисления вероятности ошибок второго рода:

$$P_2 \approx \frac{1}{\sigma(h)\sqrt{2\pi}} \int_0^1 \exp \left\{ \frac{-(E(h)-u)^2}{2(\sigma(h))^2} \right\} \cdot du. \quad (4)$$

В итоге имеем корректную математическую модель вычисления вероятностей ошибок второго рода доверенного нейросетевого приложения на малых выборках.

### Заключение

Современные информационно-телекоммуникационные технологии развиваются стремительно. Уже сегодня возможна дистанционная надежная биометрическая аутентификация личности человека. Скорее всего в базе данных уполномоченного органа должны будут храниться образы владельцев паспорта (лицо [1], голос [8], автограф [3, 4], рисунки отпечатков пальцев [9], рисунки

радужной оболочки глаз [8]). Под каждую из биометрических технологий придется модифицировать и стандартизовать варианты сетей искусственных нейронов и разную предобработку данных для этих сетей. В этом отношении Россия сегодня является безусловным лидером, так как первой начала создавать национальные стандарты по автоматическому обучению [2] больших нейронных сетей и их автоматическому тестированию [7].

Эту работу по стандартизации необходимо активно продолжать в интересах развития доверенных приложений искусственного интеллекта, позволяющих повысить надежность и качество сложных технических систем. Наличие общедоступных отечественных стандартов должно породить конкуренцию на российском рынке, что в конечном итоге должно снизить стоимость продуктов искусственного интеллекта при качестве существенно выше мирового уровня.

### Библиографический список

1. Николенко, С. Глубокое обучение / С. Николенко, А. Кадури, Е. Архангельская. – Санкт-Петербург : Питер, 2018. – 480 с.
2. ГОСТ Р 52633.5–2011 Защита информации. Техника защиты информации. Автоматическое обучение нейросетевых преобразователей биометрия-код доступа.
3. Иванов, А. И. Среда моделирования «БиоНейроАвтограф» / А. И. Иванов, О. С. Захаров. – URL: <http://пниэи.рф/activity/science/noc/bioneuroautograph.zip>
4. Иванов, А. И. Автоматическое обучение больших искусственных нейронных сетей в биометрических приложениях : учеб. пособие / А. И. Иванов. – Пенза, 2013. – 30 с. – URL: [http://пниэи.рф/activity/science/noc/tm\\_IvanovAI.pdf](http://пниэи.рф/activity/science/noc/tm_IvanovAI.pdf)
5. Морелос-Сарагоса, Р. Искусство помехоустойчивого кодирования / Р. Морелос-Сарагоса. – Москва : Техносфера, 2007. – 320 с.
6. Juels, A. A Fuzzy Commitment Scheme / A. Juels, M. Wattenberg // Proc. ACM Conf. Computer and Communications Security. – Singapore, 1999. – P. 28–36.
7. ГОСТ Р 52633.3–2011 Защита информации. Техника защиты информации. Тестирование стойкости средств высокондежной биометрической защиты к атакам подбора.
8. Руководство по биометрии / Р. Болл, Дж. Х. Коннел, Ш. Панканти, Н. К. Ратха, Э. У. Сеньор. – Москва : Техносфера, 2007. – 368 с.
9. Шапкин, А. В. Развитие отечественного нейросетевого искусственного интеллекта в защищенном исполнении / А. В. Шапкин, И. А. Кубасов, А. И. Иванов // Вестник Воронежского института ФСИН России. – 2019. – № 4. – С. 132–144.

### References

1. Nikolenko S., Kadurin A., Arkhangel'skaya E. *Glubokoe obuchenie* [Deep learning]. Saint-Petersburg: Piter, 2018, 480 p. [In Russian]
2. GOST R 52633.5–2011 *Zashchita informatsii. Tekhnika zashchity informatsii. Avtomaticheskoe obuchenie neyrosetevykh preobrazovateley biometriya-kod dostupa* [GOST R 52633.5–2011 information Security. Information security techniques. Automatic training of neural network converters biometrics-access code]. [In Russian]
3. Ivanov A. I., Zakharov O. S. *Sreda modelirovaniya «BioNeyroAvtograf»* [Environment modeling "Bioneurological"]. Available at: <http://pniei.rf/activity/science/noc/bioneuroautograph.zip> [In Russian]
4. Ivanov A. I. *Avtomaticheskoe obuchenie bol'shikh iskusstvennykh neyronnykh setey v biometricheskikh prilozheniyakh: ucheb. posobie* [Automatic training of large artificial neural networks in biometric applications: textbook]. Penza, 2013, 30 p. Available at: [http://pniei.rf/activity/science/noc/tm\\_IvanovAI.pdf](http://pniei.rf/activity/science/noc/tm_IvanovAI.pdf) [In Russian]
5. Morelos-Saragosa R. *Iskusstvo pomekhoustoychivogo kodirovaniya* [The art of noise-tolerant coding]. Moscow: Tekhnosfera, 2007, 320 p. [In Russian]
6. Juels A. A., Wattenberg M. *Proc. ACM Conf. Computer and Communications Security*. Singapore, 1999, pp. 28–36.
7. GOST R 52633.3–2011 *Zashchita informatsii. Tekhnika zashchity informatsii. Testirovanie stoykosti sredstv vysokonadezhnoy biometricheskoy zashchity k atakam podbora* [GOST R 52633.3–2011 information Security. Information security techniques. Testing the resistance of highly reliable biometric security tools to matching attacks]. [In Russian]
8. Boll R., Konnel Dzh. Kh., Pankanti Sh., Ratkha N. K., Sen'or E. U. *Rukovodstvo po biometrii* [Guide to biometrics]. Moscow: Tekhnosfera, 2007, 368 p. [In Russian]
9. Shapkin A. V., Kubasov I. A., Ivanov A. I. *Vestnik Voronezhskogo instituta FSIN Rossii* [Bulletin of the Voronezh Institute of the Federal penitentiary service of Russia]. 2019, no. 4, pp. 132–144. [In Russian]

**Иванов Александр Иванович**

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

**Кубасов Игорь Анатольевич**

доктор технических наук, профессор,  
кафедра информационных технологий,  
Академия управления МВД России  
(Россия, г. Москва, ул. Зои и Александра  
Космодемьянских, 8)  
E-mail: igorak@list.ru

**Самокутьяев Александр Михайлович**

Герой России, летчик-космонавт,  
заместитель командира отряда космонавтов  
ФГБУ НИИ ЦПК им. Ю. А. Гагарина  
(Россия, Московская область, Щелковский район,  
Звездный городок)  
E-mail: samo@gctc.ru

**Ivanov Alexander Ivanovich**

doctor of technical sciences, associate professor,  
senior researcher,  
Penza Scientific Research Electrotechnical Institute  
(9 Sovetskaya street, Penza, Russia)

**Kubasov Igor Anatolyevich**

doctor of technical sciences, professor,  
sub-department of information technologies,  
Academy of Management of the Ministry  
of Internal Affairs of the Russian Federation  
(8 Zoy and Alexander Kosmodemianskih street,  
Moscow, Russia)

**Samokutyaev Alexander Mikhailovich**

Hero of Russia, pilot-cosmonaut,  
Deputy Commander of the Cosmonaut Detachment  
of the Gagarin Research Institute of the CTC  
(Star City, Shchelkovsky district, Moscow region,  
Russia)

**Образец цитирования:**

Иванов, А. И. Тестирование больших нейронных сетей на малых выборках / А. И. Иванов, И. А. Кубасов, А. М. Самокутьяев // Надежность и качество сложных систем. – 2020. – № 3 (31). – С. 72–79. – DOI 10.21685/2307-4205-2020-3-9.

А. Н. Дарьина, И. В. Прокопьев

## МЕТОД ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ КОНТРОЛЛЕРА БЕСПИЛОТНОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА НА ОСНОВЕ ОПТИМИЗАЦИИ РОЯ ЧАСТИЦ

A. N. Daryina, I. V. Prokopiev

### AN OPTIMIZATION METHOD OF THE UNMANNED VEHICLE CONTROLLER'S PARAMETERS BASED ON THE OPTIMIZATION OF PARTICLES'S ROY

**Аннотация.** Для беспилотного транспортного средства в сложных условиях, когда пространственные ограничения серьезно сужают пространство допустимых состояний, стратегия выбора пространства состояний более эффективна, чем выборка в пространстве управлений. Хотя это было очевидно, практический вопрос заключается в том, как его достичь, одновременно удовлетворяя жестким ограничениям динамической осуществимости транспортного средства. В этой статье представлена система управления беспилотного транспортного средства на основе контроллера модели прогнозирующего интегрального пути (MPPI), глубокой сверточной нейронной сети (CNN) для понимания сцены в реальном времени и метода оптимизации роя частиц (PSO) для нахождения вектора оптимальных параметров функции стоимости. Метод основан на оптимизации функции стоимости, которая определяет, где на поверхности пути должно двигаться транспортное средство.

**Ключевые слова:** беспилотное транспортное средство, модель прогностического управления, нейронная сеть, метод оптимизации роя частиц.

**Abstract.** For an unmanned vehicle, in difficult conditions, when spatial constraints seriously narrow the space of admissible states, the strategy of choosing a state space is more effective than sampling in the control space. Although this was obvious, the practical question is how to achieve it while meeting the stringent constraints of the vehicle's dynamic feasibility. This article presents an unmanned vehicle control system based on the predictive integrated path model (MPPI) controller, deep convolutional neural network (CNN) for real-time scene understanding and particle swarm optimization (PSO) to find the vector of optimal cost function parameters. The method is based on the optimization of the cost function, which determines where the vehicle should move on the surface of the path.

**Keywords:** unmanned vehicle, predictive control model, neural network, particle swarm optimization method.

### Введение

Целью управления беспилотного транспортного средства (БТС) обычно является перевод БТС из начального состояния в заданное конечное состояние или осуществление (отслеживание) заданного программного движения БТС. Синтезируемые законы управления должны обеспечивать требуемые показатели качества (точность, быстродействие и т.п.) по всем управляемым координатам с учетом заданных ограничений на управление и состояние БТС. Кроме того, практически важно, чтобы эти законы управления были оптимальными по отношению к заданному функционалу качества. Однако в ряде случаев этого недостаточно и требуется синтезировать законы управления, обеспечивающие достижение цели управления в широком классе неопределенности модели динамики БТС. С другой стороны, система управления должна обеспечить управление с учетом динамических ограничений в реальном времени, параметры которых заранее не известны.

Сложность решения рассматриваемой задачи классическими методами (метод Понтрягина, метод редукции к задаче нелинейного программирования и другие эвристические методы) заключается в том, что требуется большое количество вычислений и он не может быть реализован на борту робота в процессе его эксплуатации.

Наиболее общий подход к решению задач управления в реальном времени основан на использовании метода предсказания траектории, обеспечивающей возможность добиться прогресса на пути достижения цели [1]. Основная проблема реализации этого подхода состоит в том, что при моделировании необходимо знать не только информацию о модели, но и информацию об окружающей среде. В работе [2] предлагается генерировать множество траекторий с различным управлением и выбирать их по дополнительному функционалу, который учитывает внешние факторы, в том числе и динамические фазовые ограничения. Данный функционал определяется разработчиком системы управления и ставится на борт объекта до реализации алгоритма управления. Построение такой функции требует существенного предварительного анализа внешней среды и сопряжено с возможностью внесения корректировки при выборе траектории.

Тем не менее все эти подходы основаны на очень точной позиции из внешнего источника (либо GPS, либо захват движения). Рассматривается автономное вождение в сложных условиях с активным вождением, используя только внутренние датчики, такие как камеры и ИДУ. Есть несколько способов решения этой проблемы. Существует много подходов SLAM, в которых для обеспечения точного положения используются камеры [3, 4], LIDAR [5] или другие комбинации датчиков [6]. Эти системы обычно обеспечивают положение относительно сгенерированной карты. Эти методы имеют тенденцию быть вычислительно дорогими. Альтернативный метод обеспечения абсолютной позиции использует глубокие нейронные сети для прямой регрессии позиции оценки в районе, посещенном ранее [7]. Однако этот метод локализации еще недостаточно точен, чтобы его можно было напрямую использовать для контроля.

В данной работе применяется модель прогностического интегрального управления (MPPI) [8, 9]. Метод основан на оптимизации функции стоимости, которая определяет, где на поверхности пути должно двигаться транспортному средству. Поэтому поверхность должна кодировать текущее и будущее положение дороги, препятствий, пешеходов и другие транспортные средства. Сеть обучена так, чтобы стоимость была самая низкая в центре дорожки и выше от центра. Эта карта стоимости может затем непосредственно вводиться в алгоритм прогностического управления моделью. Прогностическое управление моделью работает путем чередования оптимизации и выполнения: сначала оптимизируется последовательность управления с разомкнутым контуром (генерируются тысячи траекторий после чего считается их стоимость на основе функционала, конкретный вид и параметры которого зависят от ручной настройки и личного опыта разработчика), затем первое управление в этой последовательности выполняется транспортным средством и затем принимается обратная связь о состоянии, и весь процесс повторяется.

Параметры оператора стоимости в алгоритме MPPI настраиваются вручную, а перспективным подходом является применение методов обучения с подкреплением (RL). Большинство предыдущих работ с MPC фокусируется на задачах стабилизации или отслеживания траектории. Ключевой разницей между классическими MPC и MPC для обучения с подкреплением является то, что задачи RL являются сложными задачами. Сложность целей в задачах обучения с подкреплением заключается в том, что увеличиваются вычислительные затраты на оптимизацию, так как оптимизация должна происходить также в режиме реального времени.

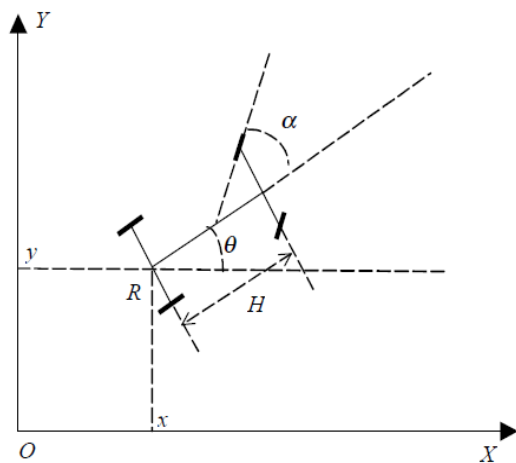
Алгоритм MPPI позволяет в реальном времени обрабатывать сложные нелинейные функции динамики и стоимости (тысячи траекторий), но, как и классические MPC, алгоритм страдает от ухудшения устойчивости, когда моделируемая динамика отличается от истинной динамики транспортного средства. Стратегией борьбы с этой проблемой может быть настройка параметров модели объекта управления и параметров функции стоимости с помощью эволюционного метода обучения с подкреплением, а также применения глубокой сверточной нейронной сети (CNN) для понимания сцены в реальном времени.

### **Идентификация модели беспилотного транспортного средства**

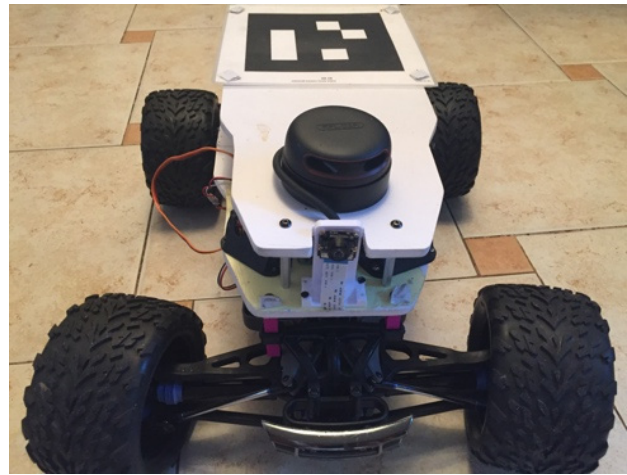
Объектом управления является БТС, построенное с использованием автомобильного шасси 1/10 масштаба (рис. 1,б). БТС весит 1,5 кг и способен развивать скорость до 10 м/с.

Вычисления выполняются с помощью комплекта NVIDIA Jetson TX2. Измерение локальных координат движения БТС проводилось в Робототехническом центре ФИЦ ИУ РАН [10].

Два передних колеса БТС служат для рулевого управления, а два задних колеса – для отслеживания. Кинематическая схема управления движением БТС показана на рис. 1.



а)



б)

Рис. 1. Кинематическая схема управления движением БТС:

$\alpha$  – угол поворота руля;  $\theta$  – угол ориентации БТС относительно оси  $x$ ;

$H$  – расстояние между передней и задней осями робота;

$R$  – базовая точка, расположенная по середине задней оси робота;  $x, y$  – координаты

Задача идентификации обычно формулируется как задача оценивания параметров модели системы, которая обладает существенными чертами реальной системы и характеризует ее динамические свойства в удобной для синтеза управления форме.

Традиционным методом построения моделей динамических объектов является реализация процедуры идентификации с использованием регрессионных модельных структур.

Регрессия непосредственно связана с задачей прогнозирования величины выхода  $y(t)$  на основе информации, полученной при измерении других величин  $\varphi_i$ ,  $i = \overline{1, d}$ , содержащих информацию о прошлом поведении системы.

Для БТС, изображенного на рис. 1, б, задача идентификации состоит в нахождении функции  $g(\varphi)$  такой, чтобы оценка  $\hat{y} = g(\varphi)$  удовлетворяла некоторому критерию и была прогнозом величины  $y(t)$ . Функция  $g(\varphi)$  – функция регрессии, должна быть некоторым методом оценена по экспериментальным данным, т.е.  $g(\varphi) = g(\varphi, \mathbf{q})$ , где  $\mathbf{q}$  – вектор настраиваемых параметров.

Задача состоит в сборе необходимого количества экспериментальных данных во всем рабочем диапазоне системы  $Z^L = \{\mathbf{u}(t), \mathbf{y}(t)\}$ ,  $t = \overline{1, L}$ . Полнота и достоверность полученных данных во многом определяют качество идентификации.

Таким образом, динамический объект может быть представлен в следующем виде:

$$\hat{y}(t | \mathbf{q}) = g(\varphi(t, \mathbf{q}), \mathbf{q}). \quad (1)$$

Прогнозирующая модель динамики модели мобильного робота  $g(\varphi(k, \mathbf{q}), \mathbf{q})$  может быть реализована на нейросетевой модельной структуре, имеющей следующее математическое представление:

$$g_i(\varphi(t, \mathbf{q}), \mathbf{q}) = \hat{y}_i(t | \mathbf{q}) = \hat{y}_i(t | \mathbf{w}, \mathbf{W}) = F_i \left( \sum_{j=1}^{n_h} W_{ij} f_j \left( \sum_{l=1}^{n_\varphi} w_{jl} \varphi_l + w_{j0} \right) + W_{i0} \right), \quad (2)$$

где  $f_j(x) = \tanh(x)$  – активационная функция нейронов скрытого слоя;  $F_i(x) = ax$ ;  $a = \text{const}$  – активационная функция нейронов выходного слоя;  $n_\varphi$  – размерность регрессионного вектора (число входов ИНС);  $n_h$  – число нейронов в скрытом слое;  $\mathbf{q}$  – вектор настраиваемых параметров нейронной сети, включающий весовые коэффициенты и нейронные смещения  $(w_{jl}, W_{ij})$ .

При использовании выражения (2) оптимизация параметров  $\mathbf{q}$  представляет собой отображение множества экспериментальных данных на множество параметров модели (1). Традиционно используемым критерием оптимальности является среднеквадратичная ошибка прогнозирования

$$\sigma_L(\mathbf{q}, Z^L) = \frac{1}{2L} \sum_{k=1}^L (y(k) - \hat{y}(k | \mathbf{q}))^2. \quad (3)$$

Таким образом, идентификация параметров модели (1) состоит в нахождении вектора параметров  $\mathbf{q}$ , минимизирующих критерий (3)

$$\hat{\mathbf{q}} = \arg \min_{\mathbf{q}} \sigma_L(\mathbf{q}, Z^L). \quad (4)$$

### Краткий обзор МРПИ

Рассмотрим формальную постановку задачи синтеза управления движением по траектории с дискретным временем. Задана математическая модель объекта управления

$$\dot{x}_{t+1} = \mathbf{f}(x_t, v_t), \quad (5)$$

где  $x_t$  – вектор состояния объекта,  $v_t$  – фактический вектор управления,  $x_t \in \mathbf{R}^n$ ,  $v_t \sim N(u_t, q_3)$ ,  $u_t \in U \subseteq \mathbf{R}^m$ ,  $U$  – замкнутое ограниченное множество;  $m \leq n$ ,  $N(u_t, q_3)$  – Гауссов шум с математическим ожиданием  $u_t$ . Управление должно пройти через контроллер нижнего уровня со стохастической добавкой в виде Гауссова шума, в результате фактический вектор управления определим как  $V = (v_0, v_1, \dots, v_{T-1})$  – последовательность входов через некоторое количество шагов  $T$ . Нас интересует вычисление среднего управления  $U = (u_0, u_1, \dots, u_{T-1})$ , которое минимизирует функцию стоимости

$$J(U) = \left[ q_1(x_T) + \sum_{t=0}^{T-1} [q_2(x_t) + q_3 u_t^T q_4^{-1} u_t] \right], \quad (6)$$

где  $q_1(\cdot)$  – терминальная стоимость состояния, а  $q_2(\cdot)$  – мгновенная стоимость состояния,

$S(V^m) = q_1(x_T^m) + \sum_{t=0}^{T-1} q_2(x_t^m)$  – часть стоимости, зависящая от состояния.

Алгоритм МРПИ начинается с инициализации вектора состояния  $x_0$ . Вычисление управления начинается с учета управляющей последовательности из предыдущей итерации  $U_{k-1}$ , симуляции (тысячи) траектории параллельно, каждая с различной последовательностью управления  $V^m$ , где  $m$  – реализация случайной траектории.

Затраты на управление собираются для каждого развертывания и сопоставлены с весами траектории:

$$w(V^m) = \exp \left( -\frac{1}{q_2} \left( S(V^m) - \sum_{t=0}^{T-1} u_{t,k-1}^T q_3^{-1} v_t^m - \rho \right) \right), \quad (7)$$

$\rho$  – устанавливается в минимальное значение затрат среди всех выбранных траекторий, предназначен для арифметического недопущения. Квазиоптимальное управление на каждом временном шаге вычисляется как

$$u_{t,k} = u_{t,k-1} + \frac{1}{\sum_{m=1}^M w(V^m)} \sum_{m=1}^M [w(V^m) \xi^m], \quad (8)$$

где  $\xi^m \sim N(0, q_3)$  – Гауссов шум с нулевым средним;  $M$  – число реализаций траекторий;  $\mathbf{q}$  – вектор идентифицируемых параметров функции стоимости,  $\mathbf{q} = [q_1, q_2, q_3, q_4]^T$ .

### Оптимизация параметров функции стоимости

В настоящей работе рассматривается подход, при котором параметры  $\mathbf{q}$  в (6) и нахождения управления (8) определяются методом оптимизации роя частиц (PSO) [11, 12].

В общем случае для нелинейной модели объекта (5) и функционала произвольного вида не известны универсальные методы построения синтезирующей функции (8) даже для решения частной задачи синтеза. Заметим также, что синтезирующая функция (8) может явно не зависеть от начальных значений [13]. Тем более нет универсальных методов для нахождения параметров функции стоимости. Тогда с помощью вычислительной машины можно организовать поиск решения  $\tilde{u}(\cdot)$  на множестве параметров  $\mathbf{q}$  по дополнительному функционалу в виде определения терминальных условий.

В реальности основной задачей регулирования является максимальное приближение выхода объекта к желаемому значению, определяемому уставкой. Таким образом, более естественно выглядит критерий типа

$$J(\mathbf{q}) = \sum_{k=1}^N \left( \left\| \mathbf{x}(t_f) - \mathbf{r}(t) \right\| \right)_{\mathbf{x}(0)=\mathbf{x}^{0,k}} \rightarrow \min, \quad (9)$$

где  $\mathbf{r}(t)$  – уставка, траектория для численного синтеза может быть в виде сплайна для дискретного набора точек количеством  $N$ ;  $\mathbf{q}$  – вектор идентифицируемых параметров функции стоимости;  $\mathbf{q} = [q_1, q_2, q_3, q_4]^T$  – вычисленные для оптимального управления  $\tilde{u}(\cdot)$ , полученного методом PSO, используемые следующие процедуры:

$$q_{k+1}^i = q_k^i + v_{k+1}^i, v_{k+1}^i = w_k v_k^i + c_1 r_1 (p_k^i - q_k^i) + c_2 r_2 (p_k^g - q_k^i), \quad (10)$$

где  $q_k^i$  – величина параметра;  $k$  – текущая итерация;  $v_k^i$  – величина и направление вектора скорости каждого параметра;  $w_k$  – постоянный вес;  $c_1, c_2$  – параметры ускорения;  $r_1, r_2$  – случайные числа от 0 до 1;  $p_k^i$  – лучшая найденная точка варианта параметра;  $p_k^g$  – лучшая найденная точка всех вариантов параметра.

После вычисления направления вектора  $\mathbf{v}$  параметр перемещается в точку  $q_{k+1}^i$ . В случае необходимости обновляются значения лучших точек для каждого параметра и для всех параметров в целом. После этого цикл повторяется. Так как  $p_k^i, p_k^g$  находятся после вычисления (9) (движение БТС по траектории), то алгоритм требует значительных ресурсов и запускается десятки тысяч итераций на симуляторе.

Для сужения области поиска используется принцип базисного решения. Согласно этому принципу [13] мы определяем начальные значения параметров, которые называем базисными. Тогда поиск решения сосредотачиваем в окрестности базисного решения. Если базисное решение выбрано удачно, то время поиска решения можно существенно сократить. В любом случае базисное решение можно всегда заменить хорошим решением, найденным в процессе поиска. Принцип поиска решения на основе базисного удобен при решении практических задач синтеза управления, где структуру управления может задать инженер, руководствуясь здравым смыслом и опытом.

### Сверточная нейронная сеть (CNN)

Для того, чтобы моделируемая динамика не отличалась от истинной динамики транспортного средства, необходимо точно вычислять свое состояние относительно затрат на пути к цели в прогнозируемом пространстве. На прогнозируемом пространстве в статье [14] предлагается использовать монокулярное зрение и глубокую сверточную нейронную сеть (CNN) для преобразования сцены в карту затрат в реальном времени.

Чтобы изучить функцию регрессии по пикселям, способную производить затраты на прохождение для каждого пикселя, данные обучения нужны порядка сотен тысяч кадров. Маркировка всех этих данных вручную – трудоемкий, медленный и склонный к ошибкам процесс. Необходимы датчики и камеры, которые могут связывать каждое изображение с полной оценкой состояния, включая

ориентацию и положение в сочетании с обзорной картой трека, зарегистрированного по координатам GPS, они могут быть использованы для создания сотен тысяч маркированных изображений без какой-либо ручной маркировки отдельных картинок.

Наиболее простой подход в создании обучающей маркированной выборки состоит в преобразовании реальной сцены с одной камеры с помощью библиотеки OpenCV в плотную карту затрат. На первом этапе находятся ключевые точки, выделяются ограничения трека (рис. 2,б). На втором этапе необходимо произвести трансформацию изображения с помощью матрицы гомографии по четырем или более точкам. На третьем этапе происходит кодировка изображения. Ограничения кодируются числом 255, а предпочтительный путь – нулем. Пиксели от 0 до 255 изменяются по градиенту. Сгенерированная методом МРРІ траектория будет стоять меньше, если будет условно проходить по пикселям с меньшим числом.

Кроме того, подъемы и спуски могут кодироваться определенным числом в зависимости от крутизны.

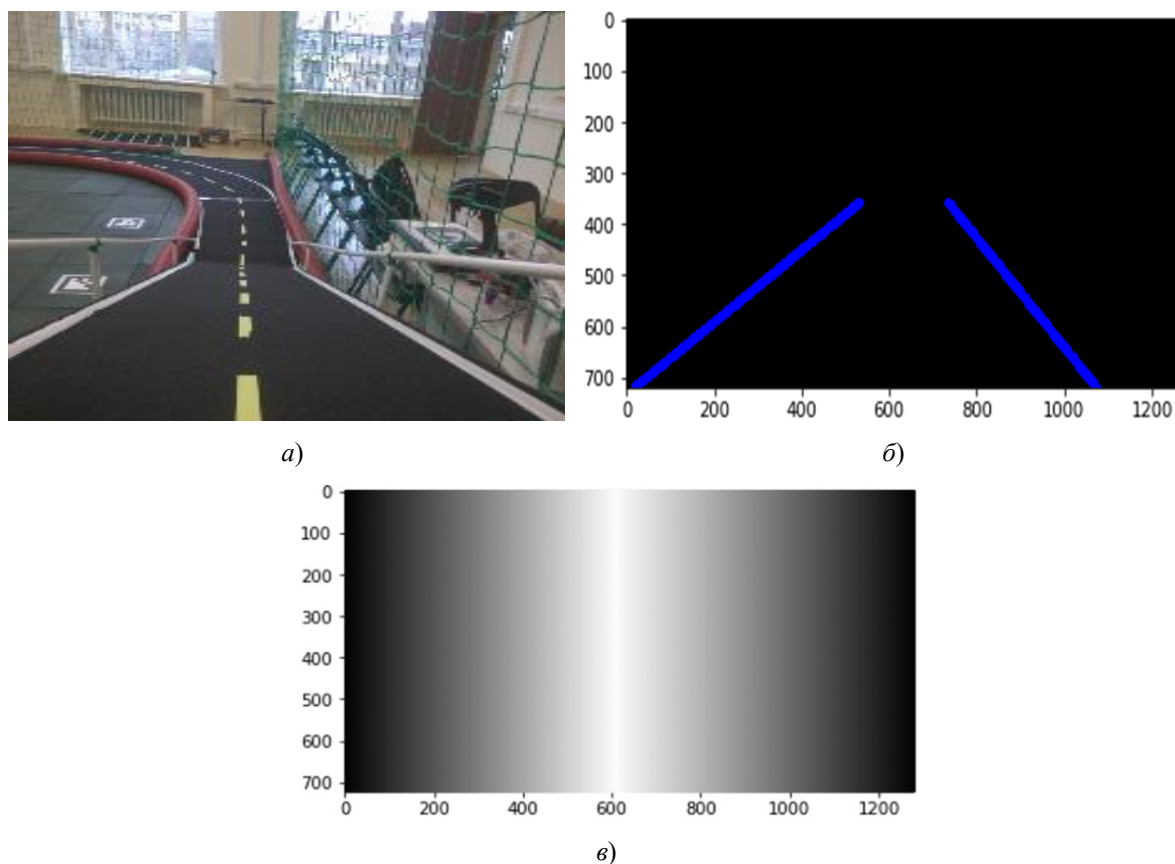


Рис. 2. Преобразование реальной сцены с одной камеры в плотную карту затрат

С помощью камеры БТС (см. рис. 1), которую мы использовали в наших экспериментах, были сохранены 15 000 последовательных изображений размером  $160 \times 120$  пикселей. С помощью программы преобразования были получены соответствующие изображения карты затрат непосредственно перед транспортным средством (в координатах транспортного средства). Это включает в себя значительные изменения в условиях освещения, ограничений и позы БТС на треке. После этого была обучена сверточная нейронная сеть. Архитектура CNN ограничена для работы в режиме реального времени на Nvidia Jetson TX2.

Сеть принимает входные изображения  $160 \times 120$  и передает их через несколько фильтров свертки и два объединенных слоя, за которыми следует набор из четырех расширенных фильтров свертки. Наши сети используют сверточные блоки  $3 \times 3$  с BatchNorm и ReLU. По сравнению с прямым методом получения карты затрат с помощью OpenCV, обученная таким образом сеть может терпеть удаление небольших областей трека из-за засвечивания и все еще производить карты стоимости, пригодные для использования.

### Заключение

В этой работе представлены полевые эксперименты, демонстрирующие новые возможности синтеза системы управления на основе прогнозирующего контроллера, использующего информацию, в выводе нейронной сети. Карта затрат подходит для планирования, когда точное местоположение на трассе не верно.

Параметры контроллера оптимизируются с помощью эволюционного алгоритма метода оптимизации роя частиц. Моделирование показывает улучшение работы прогнозирующего контроллера МРПИ, но зависит от инициализации параметров и выбора критерия оптимизации.

*Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант № 18-29-03061-мк), результаты раздела 3 получены при поддержке РНФ (проект № 19-11-00258).*

### Библиографический список

1. Mayne, D. Q. Model predictive control: Recent developments and future promise / D. Q. Mayne // *Automatica*. – 2014. – Vol. 50, № 12. – P. 2967–2986.
2. Howard, T. Optimal rough terrain trajectory generation for wheeled mobile robots / T. Howard, A. Kelly // *International Journal of Robotics Research*. – 2007. – Vol. 26, № 2. – P. 141–166.
3. Engel, J. Lsd-slam: Large-scale direct monocular slam / J. Engel, T. Schops, D. Cremers // *European Conference on Computer Vision*. – Springer, 2014. – P. 834–849.
4. Mur-Artal, R. Orb-slam: a versatile and accurate monocular slam system / R. Mur-Artal, J. M. M. Montiel, J. D. Tardos // *IEEE Transactions on Robotics*. – 2015. – Vol. 31 (5). – P. 1147–1163.
5. Zhang, J. Lidar odometry and mapping in real-time / J. Zhang, S. Singh Loam // *Robotics : Science and Systems*. – 2014. – Vol. 2. – P. 634–637.
6. Kinectfusion: Real-time dense surface mapping and tracking / R. A. Newcombe, S. Izadi, O. Hilliges, D. Molyneaux, D. Kim, A. J. Davison, P. Kohi, J. Shotton, S. Hodges, A. Fitzgibbon // *Mixed and augmented reality (ISMAR), 2011 10th IEEE international symposium*. – 2011. – P. 127–136.
7. Kendall, A. Modelling uncertainty in deep learning for camera relocalization / A. Kendall, R. Cipolla // *Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. – 2016. – P. 1–8.
8. Aggressive driving with model predictive path integral control / G. Williams, P. Drews, B. Goldfain, J. M. Rehg, E. A. Theodorou // *2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. – 2016. – P. 1433–1440.
9. Williams, G. Model predictive path integral control: From theory to parallel computation / G. Williams, A. Aldrich, E. A. Theodorou // *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*. – 2017. – P. 1–14.
10. Дарьина, А. Н. Робототехнический центр ФИЦ ИУ РАН / А. Н. Дарьина, А. И. Дивеев, И. В. Прокопьев // *Вопросы теории безопасности и устойчивости систем*. – Москва : ФИЦ ИУ РАН, 2019. – Вып. 21. – С. 66–77.
11. Weise, T. Global Optimization Algorithms – Theory and Application : Ph.D Thesis / T. Weise. – University of Kassel, 2008. – P. 184–186.
12. Kennedy, J. Particle swarm optimization / J. Kennedy, R. Eberhart // *Proceedings of IEEE International conference on Neural Networks*. – 1995. – P. 1942–1948.
13. Diveev, A. The Network Operator Method for Search of the Most Suitable Mathematical Equation / A. Diveev, E. Sofronova // *Bio-Inspired Computational Algorithms and Their Applications* / ed. by Dr. Shangce Gao. – InTech, 2012. – P. 19–42.
14. Information Theoretic MPC for Model-Based Reinforcement Learning Conference / G. Williams, N. Wagnen, B. Goldfain, P. Drews, J. M. Rehg, B. Boots, A. E. Theodorou // *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) (29 May – 3 June 2017)*. – 2017. – P. 361–363.

### References

1. Mayne D. Q. *Automatica*. 2014, vol. 50, no. 12, pp. 2967–2986.
2. Howard T., Kelly A. *International Journal of Robotics Research*. 2007, vol. 26, no. 2, pp. 141–166.
3. Engel J., Schops T., Cremers D. *European Conference on Computer Vision*. Springer, 2014, pp. 834–849.
4. Mur-Artal R., Montiel J. M. M., Tardos J. D. *IEEE Transactions on Robotics*. 2015, vol. 31 (5), pp. 1147–1163.
5. Zhang J., S. Singh Loam *Robotics: Science and Systems*. 2014, vol. 2, pp. 634–637.
6. Newcombe R. A., Izadi S., Hilliges O., Molyneaux D., Kim D., Davison A. J., Kohi P., Shotton J., Hodges S., Fitzgibbon A. *Mixed and augmented reality (ISMAR), 2011 10th IEEE international symposium*. 2011, pp. 127–136.
7. Kendall A., Cipolla R. *Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. 2016, pp. 1–8.

8. Williams G., Drews P., Goldfain B., Rehg J. M., Theodorou E. A. *2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. 2016, pp. 1433–1440.
9. Williams G., Aldrich A., Theodorou E. A. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*. 2017, pp. 1–14.
10. Dar'ina A. N., Diveev A. I., Prokop'ev I. V. *Voprosy teorii bezopasnosti i ustoychivosti system* [Questions of the theory of security and stability of systems]. Moscow: FITs IU RAN, 2019, iss. 21, pp. 66–77. [In Russian]
11. Weise T. *Global Optimization Algorithms – Theory and Application: Ph.D Thesis*. University of Kassel, 2008, pp. 184–186.
12. Kennedy J., Eberhart R. *Proceedings of IEEE International conference on Neural Networks*. 1995, pp. 1942–1948.
13. Diveev A., Sofronova E. *Bio-Inspired Computational Algorithms and Their Applications*. Ed. by Dr. Shangce Gao. InTech, 2012, pp. 19–42.
14. Williams G., Wagener N., Goldfain B., Drews P., Rehg J. M., Boots B., Theodorou A. E. *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) (29 May – 3 June 2017)*. 2017, pp. 361–363.

**Дарьина Анна Николаевна**

кандидат физико-математических наук, доцент,  
ведущий научный сотрудник,  
Федеральный исследовательский центр  
«Информатика и управление»  
Российской академии наук  
(Вычислительный центр  
им. А. А. Дородницына РАН)  
(Россия, г. Москва, ул. Вавилова, 44, стр. 2)  
E-mail: daryina@ccas.ru

**Прокопьев Игорь Витальевич**

доктор технических наук,  
ведущий научный сотрудник,  
Федеральный исследовательский центр  
«Информатика и управление»  
Российской академии наук,  
(Вычислительный центр  
им. А. А. Дородницына РАН)  
(Россия, г. Москва, ул. Вавилова, 44, стр. 2)  
E-mail: fvi2014@list.ru

**Darina Anna Nikolaevna**

candidate of physical and mathematical sciences,  
associate professor, leading researcher,  
Federal research center  
«Computer science and control» of RAS  
(Dorodnitsyn computer center  
of the Russian Academy of Sciences)  
(bld. 2, 44 Vavilova street, Moscow, Russia)

**Prokopyev Igor Vitalevich**

doctor of technical sciences, leading researcher,  
Federal research center  
«Computer science and control» of RAS  
(Dorodnitsyn computer center  
of the Russian Academy of Sciences)  
(bld. 2, 44 Vavilova street, Moscow, Russia)

**Образец цитирования:**

Дарьина, А. Н. Метод оптимизации параметров контроллера беспилотного транспортного средства на основе оптимизации роя частиц / А. Н. Дарьина, И. В. Прокопьев // Надежность и качество сложных систем. – 2020. – № 3 (31). – С. 80–87. – DOI 10.21685/2307-4205-2020-3-10.

А. С. Боков, В. Г. Важенин, В. В. Мухин, А. А. Иофин

## ПРИМЕНЕНИЕ ПРОТОКОЛА UDP И MATLAB В КАЧЕСТВЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЯДРА ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ КОМПЛЕКСА МОДЕЛИРОВАНИЯ СИГНАЛОВ РАС

A. S. Bokov, V. G. Vazhenin, V. V. Mukhin, A. A. Iofin

### COMPLEX OF MODELING OF RADAR SIGNALS USING THE UDP PROTOCOL AND MATLAB AS A COMPUTING CORE

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Известно, что математическое моделирование позволяет разработчикам сравнивать и обоснованно выбирать параметры формирования и обработки сигналов различных систем, в том числе с учетом сочетания неидеальности технических средств и многообразия условий применения. Длительная история разработки и совершенствования радиолокационных станций (РЛС) привела к накоплению наукоемких математических моделей, разработанных с использованием часто несовместимых по коду программных модулей. В ряде случаев, например, при построении системной модели устройства или переводе моделей на новую вычислительную платформу, требуется организовать возможность совместной работы моделей в рамках единого программного комплекса. *Материалы и методы.* В статье рассмотрен программный комплекс, предназначенный для моделирования радиолокационных сигналов бортовых РЛС. При этом интерфейс пользователя, выбор параметров радиолокационной сцены и управление процессом моделирования реализованы на языке высокого уровня Delphi, а в качестве вычислительного ядра выбран MATLAB. Взаимодействие Windows-приложения пользователя с MATLAB выполняется по протоколу UDP по интерфейсу Ethernet, так что среда MATLAB физически может располагаться на удаленном сервере. Весь процесс моделирования радиосигналов поделен на пять последовательных шагов, на каждом из которых выполняется одна модель. От шага к шагу переменные сохраняются в рабочем пространстве MATLAB. *Выводы.* Такой способ построения программного комплекса позволил выполнить условия быстрой разработки функционального дружественного интерфейса пользователя, использования нескольких математических моделей с применением матричных вычислений и комплексных чисел, реализации быстрой коллективной разработки и доработки математических моделей комплекса без recompilation Windows-приложения пользователя. Приведены конкретные примеры моделирования радиосигналов и изображений с помощью предлагаемо-

**Abstract.** *Background.* It is known that mathematical modeling allows researchers to compare and reasonably choose the parameters of the formation and processing of signals of various systems, including taking into account the combination of non-ideal technical means and a variety of application conditions. The long history of the development and improvement of radar systems has led to the accumulation of high-tech mathematical models developed using often incompatible source codes. In some cases, for example, when customizing a system-level model of a device or transferring models to a new computing platform, it is necessary to organize the possibility of joint work of models within a common software complex. *Materials and methods.* The article considers a software complex aimed to simulate signals for airborne radars. At the same time, the user interface, the choice of parameters of the radar scene and the control of the modeling process are implemented in the high-level language Delphi, and MATLAB is chosen as the computational core. Interaction between a user's Windows-application and MATLAB is performed via UDP protocol over Ethernet, so the MATLAB environment can physically reside on a remote server. The whole process of modeling radio signals is divided into 5 consecutive steps, each of which carries out one model. Step by step, the variables are stored in the MATLAB workspace. *Conclusions.* This method of constructing the software package allowed us to fulfill the conditions for the rapid development of a functional friendly user interface, the use of several mathematical models using matrix calculations and complex numbers, the implementation of fast collaborative development and refinement of mathematical models of the software complex without recompiling the user's Windows-application. Specific examples of modeling radio signals and images using the proposed software complex based on the use of the UDP protocol and MATLAB as computing core are given.

го программного комплекса, основанного на применении протокола UDP и MATLAB в качестве вычислительного ядра.

**Ключевые слова:** радиолокационный сигнал, математическое моделирование, программный комплекс, MATLAB, протокол UDP.

**Keywords:** radar signal, mathematical modeling, software complex, MATLAB, UDP protocol.

## Введение

При разработке устройств в различных областях техники используются всего несколько типовых подходов-процессов. Наиболее простой и быстрый – это сборка устройства из доступных компонентов, его настройка и программирование для выполнения нужных функций. Как правило, такое устройство должно иметь работающий прототип и/или очевидную возможность реализации, иначе есть риск выбрать не те компоненты, не те методы и «провалить» сроки, бюджет или всю разработку. Но современные устройства становятся все сложнее и сложнее. Часто, еще до выбора компонентов, требуется сразу получить некоторый оптимальный набор параметров реализации, определяющих надежность, точность, малогабаритность, энергоэффективность, стоимость производства, возможность перенастройки, совместимость и др. Эти параметры всегда противоречивы. Но выход есть! Это использование математического моделирования отдельных (ключевых) составляющих и/или всего устройства в целом. Последний, комплексный вариант разработки исполняемой модели (модели функционирования) устройства относится к модельно-ориентированному проектированию (МОП) [1].

МОП позволяет проверять работоспособность выбранных методов формирования и обработки на уровне сигналов и/или на уровне подсистем и их интерфейсов. Однако МОП является и наиболее тщательным и, соответственно, трудоемким процессом разработки, так как необходимо как-то реализовывать моделирование даже готовых (сторонних) подсистем. Впрочем, показано, что при наличии достаточного спектра компонентов, использования опыта предыдущих разработок время разработки и различные проектные риски снижаются, оставляя основные преимущества МОП: четко сформулировать цель, убедить себя и заказчика в возможности решения задачи, в возможности получения некоторых оптимальных сочетаний параметров проектируемого устройства [2, 3]. В большинстве случаев новые устройства строятся по отработанным технологиям, поэтому математическому моделированию подвергаются только новые или критически важные (дорогие для натурной отработки) алгоритмы обработки сигналов. Дополнительно стоит назвать перспективный и уже применяемый, в том числе в рамках МОП, метод разработки программного кода по математической модели [4], который позволяет привлекать «непрограммистов» (системных интеграторов, математиков и др.) непосредственно к стадии разработки частей системного кода для проектируемых устройств.

Таким образом, математическое моделирование позволяет сравнивать и обоснованно выбирать параметры формирования и обработки сигналов различных систем, в том числе с учетом сочетания неидеальности технических средств и многообразия условий применения. Длительная история разработки и совершенствования систем, например в области радиолокации [2, 5, 6], привела к накоплению наукоемких математических моделей, разработанных с использованием часто несовместимых по коду программных модулей. На границе XX–XXI вв. для разработок математических моделей радиосистем использовались языки высокого уровня Паскаль, Фортран, Си. К сожалению, данные языки в силу их универсальности изначально не приспособлены для реализации математических моделей: не удобны, недостаточно библиотек стандартных функций обработки и анализа сигналов [7]. Поэтому в настоящее время, в зависимости от требуемых возможностей, для решения конкретной задачи стоит выбрать универсальный или специализированный пакет математического моделирования. Здесь, в частности для моделирования радиотехнических систем, следует упомянуть наиболее известные пакеты и средства:

- GNU Radio – открытый и бесплатный пакет программ, предназначенный для цифровой обработки сигналов (ЦОС), имеется визуальный редактор GNURadio Companion;
- Keysight SystemVue – САПР для моделирования и проверки электронного оборудования на системном уровне, имеется библиотека моделей для РЛС;
- MATLAB с богатым набором библиотек для ЦОС, матричных вычислений, тулбоксов графического построения моделей и МОП в Simulink [1, 8];

- SimInTech и программный комплекс ПК «МВТУ» – современная среда интеллектуального САПР для моделирования, исследования динамики и проектирования;
- VisSim, MATRIXx, Mathcad, Labview и др.

Перечисленные пакеты моделирования хотя и ориентированы на простоту построения моделей, но требуют определенной подготовки пользователя и, к сожалению, не позволяют реализовать «дружественный» и функциональный интерфейс пользователя либо его разработка и корректировка требуют больших усилий и допущений. При построении комплексной системной модели устройства или переводе моделей на новую вычислительную платформу требуется организовать возможность совместной последовательной и/или параллельной работы различных моделей под управлением единого интерфейса пользователя, созданного с применением привычных компонентов ввода и редактирования, доступных в языках разработки программного обеспечения под платформу Windows [7, 9, 10]. В таких случаях заманчиво использовать достоинства нескольких платформ разработки, автоматическое взаимодействие между которыми возможно, в том числе с помощью различных стандартных интерфейсов. Например, MATLAB позволяет выполнить оперативный прием команд/параметров и передачу результатов в форме UDP датаграмм, передаваемых по интерфейсу Ethernet.

### Постановка задачи и методы ее решения

Для моделирования процессов формирования и обработки отраженных радиолокационных сигналов требовалось решить задачу разработки программного комплекса, который должен включать удобный интерфейс пользователя – Windows-приложение для выбора параметров РЛС и фоновой обстановки (радиолокационной сцены). При этом для выполнения быстрых матричных вычислений, в том числе при комплексном представлении сигналов, в качестве основного вычислительного ядра был выбран MATLAB.

Для реализации Windows-приложения выбран универсальный язык высокого уровня Delphi (Object Pascal) с набором визуальных компонент для быстрого построения «дружественного» интерфейса пользователя в среде разработки IDE Delphi. Сохранение параметров для каждой радиолокационной сцены выполняется в отдельном текстовом ini-файле, который таким образом должен содержать описание параметров зондирующего сигнала РЛС, траекторию движения летательного аппарата (ЛА), карту местности, а также параметры обработки отраженного сигнала, например, для построения радиолокационного изображения (РЛИ) моделируемой местности.

Windows-приложение по соответствующим командам пользователя выполняет управление процессом моделирования путем формирования и выдачи MATLAB-команд. Такие команды представляют из себя строки командного интерпретатора, описанные в документации к MATLAB, т.е. это могут быть строки вида «n=0:32; s(n)=sin(pi\*n/8); do\_function;» и т.п.

Взаимодействие с MATLAB выполняется по интерфейсу Ethernet, так что среда MATLAB физически может располагаться на удаленном мощном сервере, что также позволяет снизить количество дорогостоящих лицензий среды MATLAB. Часть результатов, например графики, могут сохраняться в файлы для последующего отображения их в Windows-приложении. Для корректного выполнения строковых команд, поступающих на указанный порт в форме UDP датаграмм, с одновременной обработкой возможных ошибок разработан специальный *m*-файл – скрипт «rServer.m» для MATLAB. Данный скрипт открывает рабочий локальный UDP-порт, а затем в цикле ожидает поступления команд, выполняет команды в общем рабочем пространстве MATLAB, выдает ответы по протоколу связи на UDP-порт Windows-приложения или завершает работу при поступлении команды «exit».

### Шаги процесса моделирования радиосигналов

Весь процесс моделирования сигналов РЛС поделен на серию последовательных шагов, на каждом из которых выполняется одна модель (передаются параметры и запускается *m*-скрипт) и строится один (или несколько) контрольный график. Графики помогают оценить корректность моделирования, чтобы вернуться к изменению параметров на этом или предыдущем шаге либо перейти к выполнению следующего шага. От шага к шагу переменные сохраняются в рабочем пространстве MATLAB, что существенно снижает время выполнения моделей при последовательной обработке или использовании одних и тех же массивов сигналов.

Таким образом, процесс моделирования радиолокационных (РЛ) сигналов с помощью Windows-приложения программного комплекса является интерактивным и пошаговым. Перечислим

эти шаги (им соответствуют названия вкладок-переключателей в центральной панели окна программы – рис. 1) с кратким содержанием.

Шаг 0 – начало: содержит список подготовленных ранее РЛ-сценариев (включает параметры лоатора, траектории, поверхности и способа обработки), можно создать новый рабочий сценарий путем копирования в сценарий (фактически это ini-файл) с новым именем.

Шаг 1 – радиолокатор: содержит параметры передатчика и антенной системы РЛС (имеется несколько подвкладок с параметрами: «Каналы, ДНА», «Для импульсного», «Для непрерывного», «Общие параметры» – см. рис. 1).

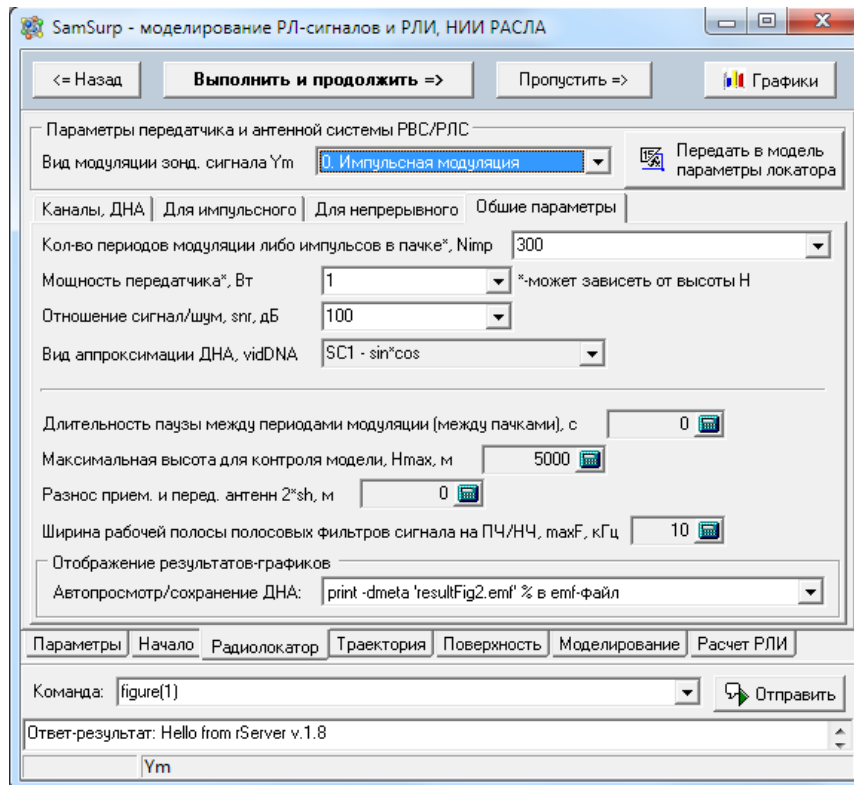


Рис. 1. Окно выбора общих параметров радиолокатора на Шаге 1

При переходе к следующему шагу по кнопке «Выполнить и продолжить =>» запускается модель расчета и построения диаграмм направленности антенн (ДНА).

Шаг 2 – траектория: содержит начальные значения переменных – координаты и эволюции ЛА, а также их зависимость от времени в модели. Здесь выполняется модель расчета и построения траектории движения ЛА.

Шаг 3 – поверхность: содержит параметры подстилающей поверхности. Типы моделей поверхности – однородные (земная, морская), слоистые (лесная, ледовая и др.), комбинированные (сочетание разных типов). Здесь выполняется моделирование и отображение трехмерного изображения земной поверхности.

Шаг 4 – моделирование: запускает основную математическую модель расчета отраженного сигнала в приемных каналах РЛС.

Шаг 5 – расчет РЛИ: запускает основную математическую модель обработки отраженного сигнала, расчета радиолокационного изображения и анализа результатов.

При выполнении моделей в окне графиков на заданную вкладку автоматически загружается содержимое окна MATLAB-фигуры. Использование нескольких вкладок в окне графиков позволяет пользователю смотреть разные рисунки на разных шагах работы модели, вручную переключая вкладки в окне графиков. Пример окна графиков для моделей антенн бортовой радиовысотометрической системы (РВС) приведен на рис. 2. На графиках приведены примеры общей формы диаграммы направленности (ДН) антенны шириной  $50^\circ$  и сечения приемных и передающих ДН в двух плоскостях при их отклонении на  $45^\circ$ .

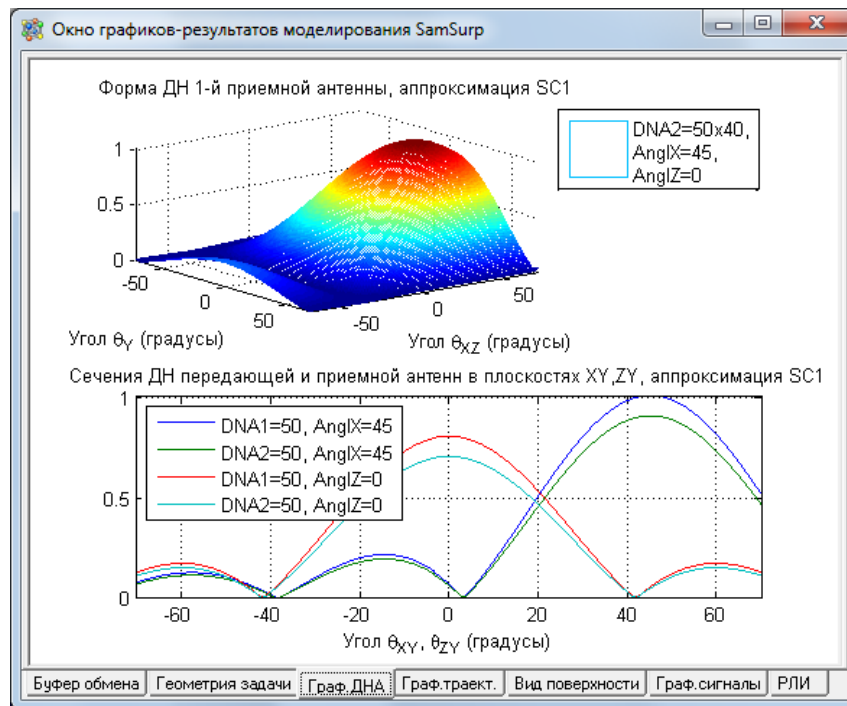
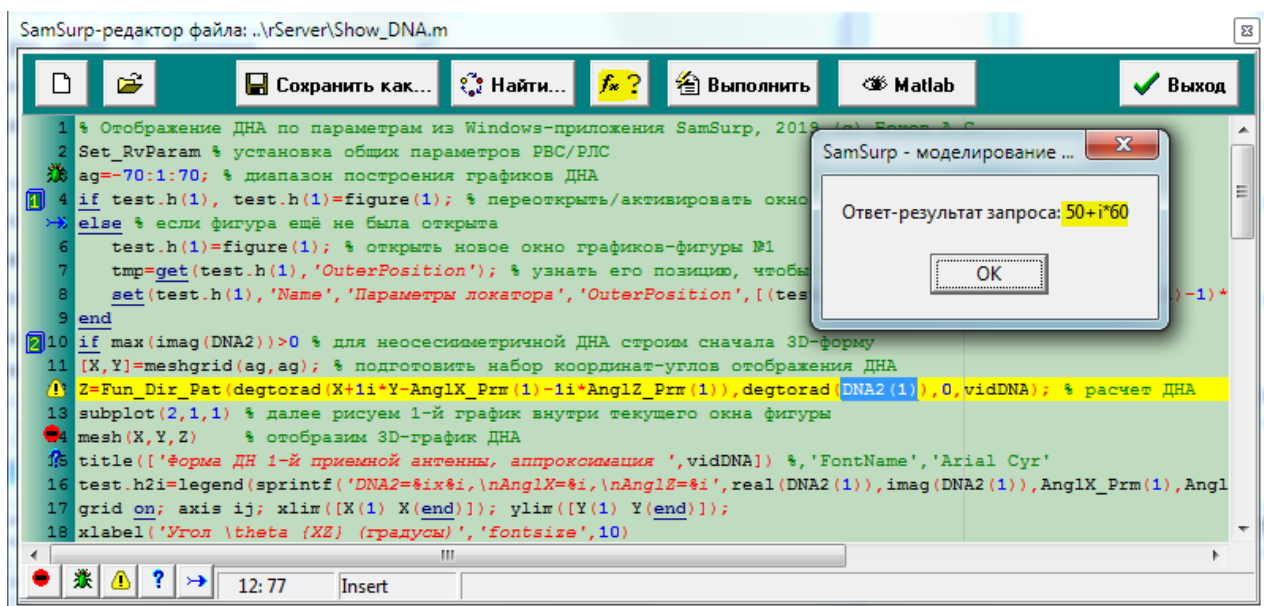


Рис. 2. Результат расчета ДН антенн радиовысотомерной системы на Шаге 1

Таким образом, на каждом шаге доступны: контроль некоторой части параметров, коррекция этих параметров, выполнение части математического моделирования (в том числе неоднократное), переход к следующему шагу, а также возврат назад на 1 или более шагов, если требуется изменение соответствующих условий/параметров моделей.

Также на любом шаге можно выполнить произвольную команду на языке MATLAB. Для этого в нижней части окна в строке «Команда» вводится или выбирается из выпадающего списка текст и нажимается кнопка «Отправить» (см. пример команды «figure» на рис. 1). Более того, имеется возможность просмотра, редактирования (доработки) и оперативного выполнения *m*-скриптов математического моделирования. При выделении выражений или переменных кнопка « $f_x$  ?» (или *Ctrl-W*) позволяют получить результат вычислений на основе текущих значений в среде математического моделирования – пример на рис. 3.

Рис. 3. Окно просмотра, редактирования и выполнения *m*-скриптов

Видно, что хотя Delphi не содержит библиотеки работы с комплексными числами, реализованный метод использования MATLAB позволяет применить все вычислительные возможности внешнего математического ядра в разработанном программном комплексе. Заметим также, что если текст в редакторе не выделен, то будет отправлен на выполнение весь код в текущей строке редактора и курсор переместится на следующую строку (построчное выполнение кода модели).

В окне просмотра-редактирования текст отображается с «подсветкой синтаксиса». Также в левом столбце, где отображаются номера строк текста, имеются возможности расстановки графических символов и нумерованных закладок от 0 до 9. Реализован алгоритм автоматической расстановки закладок и символов в зависимости от содержащихся в строках начальных команд и их положения (закомментированные строки не анализируются).

После выполнения последовательности шагов общего процесса моделирования можно перейти на вкладку «Цикл» главного окна. Здесь можно «Выполнить одну выбранную команду» из списка типовых команд либо сформировать последовательность команд и выполнить их разово или циклически. Для циклического выполнения команд включается соответствующая галочка и нажимается кнопка « Выполнить несколько выбранных галочками команд поочередно», как показано на рис. 4.

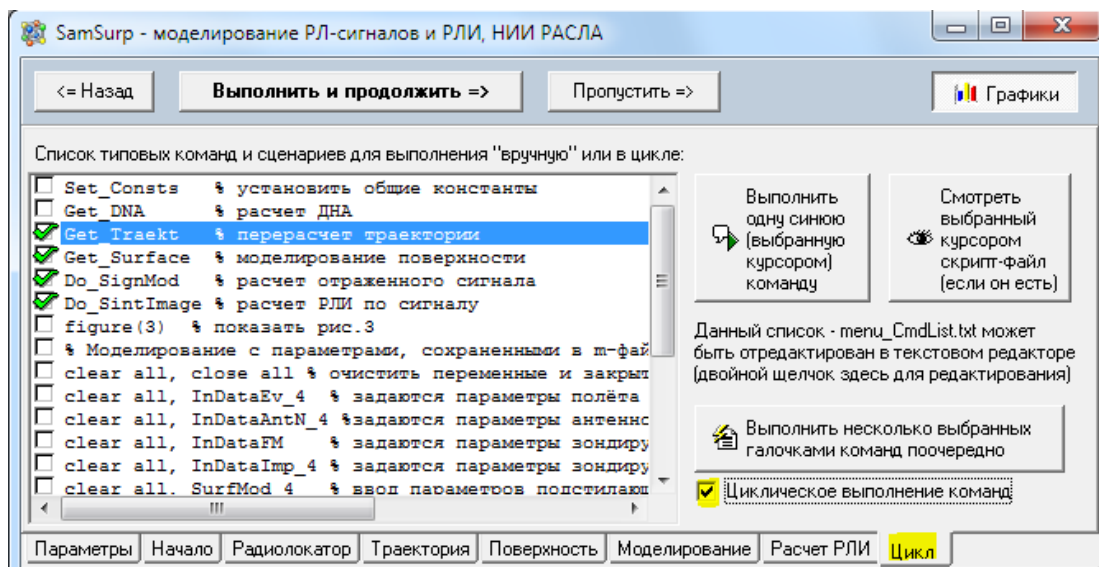


Рис. 4. Окно с вкладкой «Цикл» главного окна программы

При этом может быть реализована последовательная работа соответствующих математических моделей, имитирующая, например, непрерывный полет ЛА по бесконечной траектории, но обычно в пределах заданной местности. Пример тестового рельефа местности, используемого при математическом моделировании радиосигналов РЛС обзора земной поверхности, показан на рис. 5.

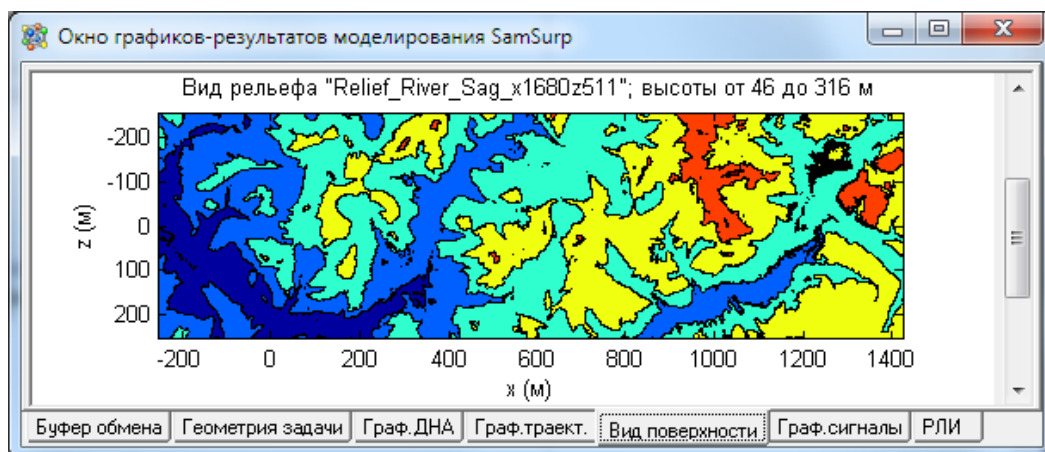


Рис. 5. Результат при просмотре рельефа выбранной поверхности на Шаге 3

Выбранный рельеф местности может быть дополнен описаниями положений границ различных типов поверхности: луг/пашня, вода (море), песок, дорога и другое, а также наличием тестовых угловых отражателей, удобных для проверки алгоритмов работы РЛС с синтезированием апертуры антенны.

### Примеры моделирования радиосигналов и изображений

В качестве примера работы программного комплекса приведем пример синтезирования апертуры антенны для горизонтального полета над тестовой поверхностью, состоящей только из угловых отражателей, расположенных на спирали, показанной для удобства красной линией (рис. 6). Траектория в таком масштабе сливается в точку (маркеры малинового цвета соответствуют высоте ЛА 100 м).

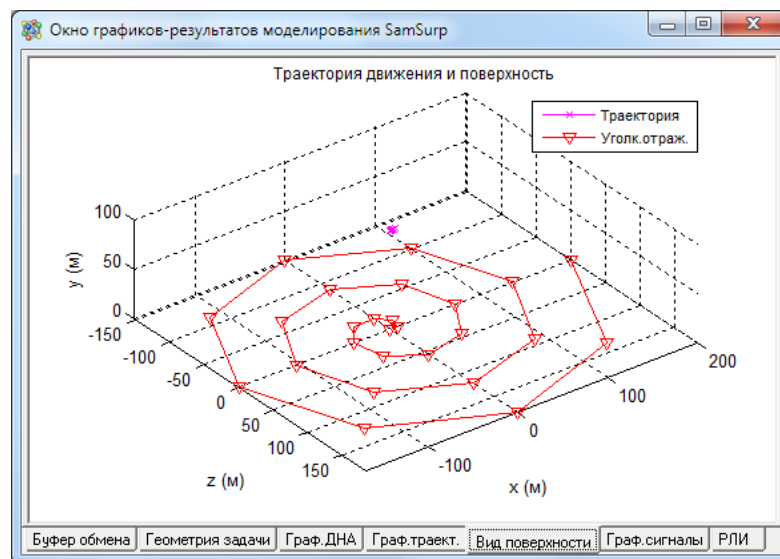


Рис. 6. Результат моделирования тестовой поверхности на Шаге 3

Пример вида огибающей сигнала (на выходе приемника РЛС) для трех зондирующих импульсов показан на рис. 7. Форма ДНА содержит боковой лепесток и проявляется в соответствующем ослаблении амплитуд импульсов, отраженных от тестовых угловых отражателей с разной наклонной дальностью от РЛС (здесь пример для высоты ЛА 1000 м).

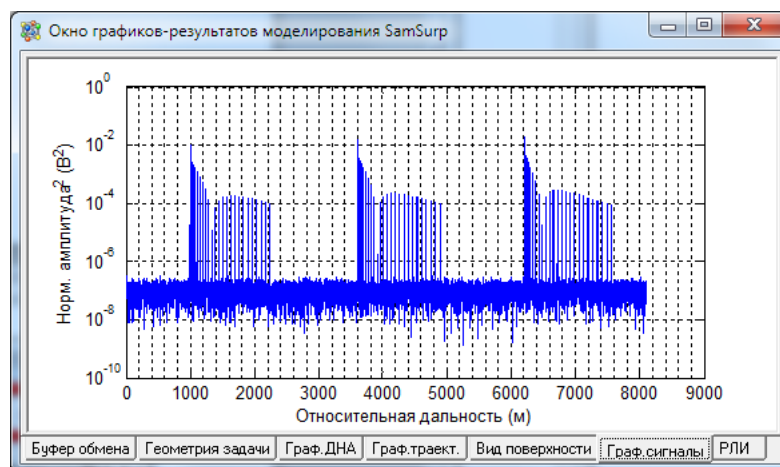


Рис. 7. Результат расчета сигнала, отраженного от тестовой поверхности на Шаге 4

Примеры полученных на Шаге 5 РЛИ приведены на рис. 8 и 9. На рис. 8 РЛИ соответствует варианту тестовой поверхности рис. 6.

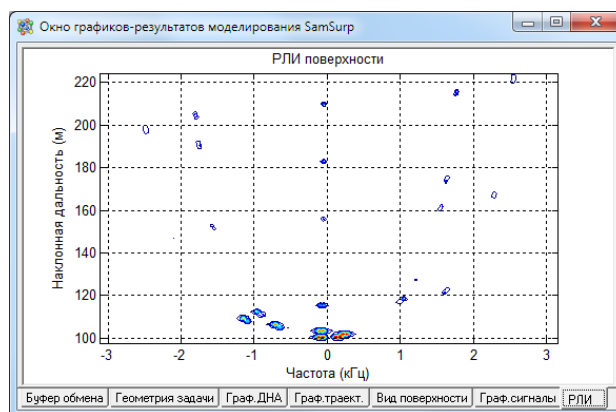


Рис. 8. РЛИ поверхности из тестовой «спирали» отражателей на Шаге 5

На рис. 9 поверхность (в пределах пятна облучения РЛС) с рельефом высотой до 25 м содержит 5000 отражателей для нескольких типов поверхности, включая расположенный в море (синий цвет) песочный остров (желтый цвет) с лугом (зеленый цвет) и водоемом (синий цвет) в центре, и дорогой-мостом (голубой цвет) через озеро, как показано слева. Соответствующее РЛИ приведено справа. Соответствующее РЛИ приведено справа.

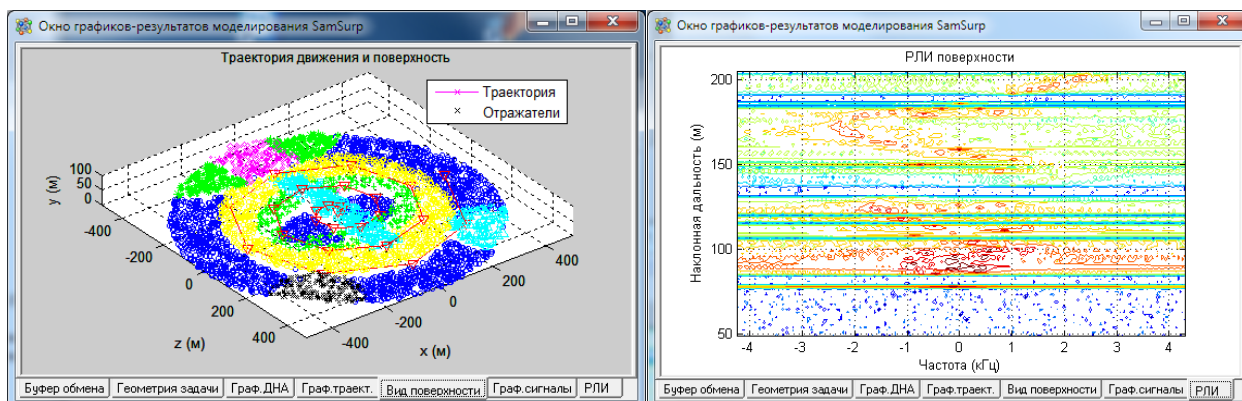


Рис. 9. Пример комбинированной земной поверхности и ее РЛИ на Шаге 5

Приведенные РЛИ получены в координатах дальность-скорость (дальность-доплеровская частота) при вертикальном облучении подстилающей поверхности [10], поэтому геометрические положения отражателей поверхности не соответствуют привычному представлению оптических изображений местности. Однако в ряде случаев такие РЛИ достаточны и удобны (вычислительно эффективны) для решения задач первичной и вторичной обработки сигналов на борту РЛС в режиме реального времени. При обработке такого РЛИ необходимо учесть переменные размеры элемента разрешения, нелинейность расстояний, а также взаимное наложение отражателей, расположенных на одной дальности слева и справа от оси полета ЛА. Представленный программный комплекс позволит выполнить разработку и выбор параметров алгоритмов обработки РЛИ, в том числе в широких условиях применения бортовых РЛС и РВС для различных моделей траектории ЛА и фоноцеловой обстановки [10].

### Заключение и рекомендации

Разработана концепция проведения модельных исследований радиолокационных сигналов, отраженных от земных поверхностей в широких условиях применения систем дистанционного зондирования Земли, включающая пятишаговый процесс моделирования, при котором на каждом шаге пользователь выполняет ввод/коррекцию параметров одной подсистемы и выполнение моделей с контролем основных результатов-графиков. Для этого программный комплекс моделирования радиосигналов включает Windows-приложение и математические модели, выполняемые в среде

MATLAB. Эти составляющие взаимодействуют по протоколу UDP, т.е. могут работать на одной ЭВМ либо в локальной или глобальной сети (по IP-адресам), что позволяет работать на относительно слабой по производительности первой ЭВМ пользователя даже без установленного пакета MATLAB. Интерфейс пользователя программного комплекса разработан с использованием среды быстрой разработки приложений IDE Delphi. При этом реализованы возможности создания и/или выбора различных радиолокационных сценариев, пошагового выполнения моделирования, исследования и оперативной корректировки (при необходимости) исходных текстов математических моделей.

Разработанный программный комплекс позволяет выполнять доработку и сравнительный анализ различных алгоритмов обработки сигналов. Код на Delphi не использует библиотек работы с комплексными числами, а предложенный метод использования MATLAB позволяет применить все вычислительные возможности внешнего математического ядра. Возможна доработка текста (*m*-сценариев) математических моделей без перекомпиляции Windows-приложения. Критически важные части наукоемких математических моделей после их отладки постепенно могут быть перенесены и встроены непосредственно в код Windows-приложения, что потенциально позволит выполнять моделирование в режиме реального времени, требующегося при разработке тестовых испытательных комплексов для полунатурного моделирования [11, 12] с использованием имитаторов физических радиолокационных сигналов.

### Библиографический список

1. Модельно-ориентированное проектирование встраиваемых систем. ЦИТМ Экспонента. – URL: <https://exponenta.ru/mbd> (дата обращения: 04.05.2020).
2. Боев, С. Ф. Управление рисками проектирования и создания радиолокационных станций дальнего обнаружения / С. Ф. Боев. – Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2017. – 430 с.
3. Климов, А. Анализ необходимости внедрения МОП и смягчение рисков при проектировании РЛС ДО / А. Климов // Технологии разработки и отладки сложных технических систем : VII Всерос. конф. Сессия: «Радиолокационные системы». – Москва, 2020. – С. 84–87.
4. Шидловский, Д. Реализация стандарта профессиональной связи DMR с помощью МОП / Д. Шидловский // Технологии разработки и отладки сложных технических систем : VII Всерос. конф. Сессия: «Системы связи». – Москва, 2020. – С. 214–216.
5. Кротов, И. С. Программно-определяемая радиосистема для обработки бортовой радиоэлектронной аппаратуры / И. С. Кротов, А. К. Кабаев // Люльевские чтения : материалы XI межрегиональной отраслевой науч.-техн. конф. (20–22 марта 2018 г.). – Екатеринбург : ЮУрГУ, 2018. – С. 61.
6. Учет переменных параметров линейной частотной модуляции в имитаторе отраженных сигналов для радиовысотомеров / А. С. Боков, В. Г. Важеннин, А. В. Гусев, Д. Ж. Нагашибаев, А. А. Иофин // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 3 (19). – С. 60–67. – DOI 10.21685/2307-4205-2017-3-9.
7. Гурин, И. А. Решение математических задач на языке Visual C# с использованием пакета MATLAB / И. А. Гурин, Н. А. Спирин, В. В. Лавров // Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве : сб. докл. V Всерос. науч.-практ. конф. (ТИМ'2016). – Екатеринбург : УрФУ, 2016. – С. 190–193.
8. Усс, М. Проектирование радиолокационных систем в MATLAB и Simulink. Вебинар / М. Усс. – URL: <http://matlab.ru/webinars/proektirovanie-radiolokacionnyh-sistem-v-matlab-i-simulink> (дата обращения: 30.12.2019).
9. Сурков, М. А. Особенности разработки тренажеров и тренажерных комплексов для подготовки специалистов РЭБ / М. А. Сурков, Ю. А. Губсков, Е. И. Савкин, Ю. Ю. Громов // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2018. – № 8. – С. 16–31.
10. Markov, Yu. Software Complex for Modeling the Work of Multichannel SAR in Wide Range of Application / Yu. Markov, A. Bokov, V. Vazhenin, S. Margilevsky // Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW). – 2019. – P. 352–355. – DOI 10.1109/RSEMW.2019.8792776.
11. Lepekhina, T. A. Radar target hardware-in-the-loop in carrier frequencies for SAR tests / T. A. Lepekhina, V. I. Nikolaev // ITM Web of Conferences. – 2019. – Vol. 30. – P. 15029. – DOI 10.1051/itmconf/20193015029
12. Боков, А. С. Ретрансляционный имитатор сигналов для проверки характеристик бортовых радиолокационных систем и устройств / А. С. Боков, В. Г. Важеннин, А. А. Иофин, В. В. Мухин // Надежность и качество сложных систем. – 2019. – № 3 (27). – С. 40–49. – DOI 10.21685/2307-4205-2019-3-5.

### References

1. *Model'no-orientirovannoe proektirovanie vstraivaemykh sistem. TsITM Eksponenta* [Model-oriented design of embedded systems. QUOTE from the Exhibitor]. Available at: <https://exponenta.ru/mbd> (accessed May 04, 2020). [In Russian]

2. Boev S. F. *Upravlenie riskami proektirovaniya i sozdaniya radiolokatsionnykh stantsiy dal'nego obnaruzheniya* [Risk management in the design and creation of radar stations of distant detection]. Moscow: Izd-vo MG TU im. N. E. Bauman, 2017, 430 p. [In Russian]
3. Klimov A. *Tekhnologii razrabotki i otladki slozhnykh tekhnicheskikh sistem: VII Vseros. konf. Sessiya: «Radiolokatsionnye sistemy»* [Technologies for developing and debugging complex technical systems: VII all-Russian conf. Session: «Radar system»]. Moscow, 2020, pp. 84–87. [In Russian]
4. Shidlovskiy D. *Tekhnologii razrabotki i otladki slozhnykh tekhnicheskikh sistem: VII Vseros. konf. Sessiya: «Sistemy svyazi»* [Technologies for developing and debugging complex technical systems: VII all-Russian conf. Session: «Communication system»]. Moscow, 2020, pp. 214–216. [In Russian]
5. Krotov I. S., Kabaev A. K. *Lyul'evskie chteniya: materialy XI mezhhregional'noy otraslevoy nauch.-tekhn. konf. (20–22 marta 2018 g.)* [Lyulyevsky readings: materials of the XI interregional branch scientific and technical conference (March 20–22, 2018)]. Ekaterinburg: YuUrGU, 2018, p. 61. [In Russian]
6. Bokov A. S., Vazhenin V. G., Gusev A. V., Nagashibaev D. Zh., Iofin A. A. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2017, no. 3 (19), pp. 60–67. DOI 10.21685/2307-4205-2017-3-9. [In Russian]
7. Gurin I. A., Spirin N. A., Lavrov V. V. *Teplotekhnika i informatika v obrazovanii, nauke i proizvodstve: sb. dokl. V Vseros. nauch.-prakt. konf. (TIM'2016)* [Heat engineering and Informatics in education, science and production: collection of reports V all-Russian scientific and practical conference (TIM'2016)]. Ekaterinburg: UrFU, 2016, pp. 190–193. [In Russian]
8. Uss M. *Proektirovanie radiolokatsionnykh sistem v MATLAB i Simulink. Vebinar* [Design of radar systems in MATLAB and Simulink. Web conference]. Available at: <http://matlab.ru/webinars/proektirovanie-radiolokatsionnykh-sistem-v-matlab-i-simulink> (accessed Dec. 30, 2019). [In Russian]
9. Surkov M. A., Gubskov Yu. A., Savkin E. I., Gromov Yu. Yu. *Promyshlennyye ASU i kontrolyery* [Industrial automated control systems and controllers]. 2018, no. 8, pp. 16–31. [In Russian]
10. Markov Yu., Bokov A., Vazhenin V., Margilevsky S. *Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW)*. 2019, pp. 352–355. DOI 10.1109/RSEMW.2019.8792776.
11. Lepekhina T. A., Nikolaev V. I. *ITM Web of Conferences*. 2019, vol. 30, p. 15029. DOI 10.1051/itmconf/20193015029
12. Bokov A. S., Vazhenin V. G., Iofin A. A., Mukhin V. V. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2019, no. 3 (27), pp. 40–49. DOI 10.21685/2307-4205-2019-3-5. [In Russian]

**Боклов Александр Сергеевич**

кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник  
научно-исследовательского центра  
радиоэлектронных систем летательных аппаратов,  
доцент департамента радиоэлектроники  
и связи Института радиоэлектроники  
и информационных технологий,  
Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина  
(Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 32)  
E-mail: a.s.bokov@urfu.ru

**Важенин Владимир Григорьевич**

кандидат технических наук,  
директор научно-исследовательского центра  
радиоэлектронных систем летательных аппаратов,  
доцент департамента радиоэлектроники  
и связи Института радиоэлектроники  
и информационных технологий,  
Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина  
(Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 32)  
E-mail: v.g.vazhenin@urfu.ru

**Bokov Aleksandr Sergeevich**

candidate of technical sciences,  
senior scientist researcher of Science Research Center  
for Radioelectronic Systems of Aerial Vehicles,  
associate professor of Department of Radioelectronics  
and Communications, Institute of Radioelectronics and  
Information Technologies,  
Ural Federal University named after  
the first President of Russia B. N. Yeltsin  
(32 Mira street, Ekaterinburg, Russia)

**Vazhenin Vladimir Grigor'evich**

candidate of technical sciences,  
director of Science Research Center  
for Radioelectronic Systems of Aerial Vehicles,  
associate professor of Department of Radioelectronics  
and Communications, Institute of Radioelectronics and  
Information Technologies,  
Ural Federal University named after  
the first President of Russia B. N. Yeltsin  
(32 Mira street, Ekaterinburg, Russia)

**Мухин Владимир Витальевич**

кандидат технических наук,  
заместитель генерального директора-  
главного конструктора по НИОКР,  
Уральское проектно-конструкторское  
бюро «Деталь»  
(Россия, Свердловская обл., г. Каменск-Уральский,  
ул. Пионерская, 8)  
E-mail: upkb.nio100@mail.ru

**Иофин Александр Аронович**

кандидат технических наук,  
заместитель главного конструктора,  
Уральское проектно-конструкторское  
бюро «Деталь»  
(Россия, Свердловская обл., г. Каменск-Уральский,  
ул. Пионерская, 8)  
E-mail: tehdep630@yandex.ru

**Mukhin Vladimir Vital'evich**

candidate of technical sciences,  
deputy general director – chief designer  
for Research and Development,  
Ural Design Bureau «Detal»  
(8 Pionerskaya street, Kamensk-Uralsky,  
Sverdlovsk region, Russia)

**Iofin Aleksandr Aronovich**

candidate of technical sciences,  
deputy chief designer,  
Ural Design Bureau «Detal»  
(8 Pionerskaya street, Kamensk-Uralsky,  
Sverdlovsk region, Russia)

**Образец цитирования:**

Боков, А. С. Применение протокола UDP и MATLAB в качестве вычислительного ядра для построения комплекса моделирования сигналов РЛС / А. С. Боков, В. Г. Важенин, В. В. Мухин, А. А. Иофин // Надежность и качество сложных систем. – 2020. – № 3 (31). – С. 88–98. – DOI 10.21685/2307-4205-2020-3-11.

И. В. Прокопьев, Е. А. Софронова

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА ИДЕНТИФИКАЦИИ МОДЕЛИ И МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫМ ТРАНСПОРТНЫМ СРЕДСТВОМ ПО ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ТРАЕКТОРИИ

I. V. Prokopyev, E. A. Sofronova

### STUDY ON MODEL IDENTIFICATION METHOD AND CONTROL METHODS FOR UNMANNED VEHICLE MOVEMENT ALONG A SPATIAL PATH

**Аннотация.** Приведены результаты идентификации нелинейной модели беспилотного транспортного средства в симуляторе Gazebo на основе нейросетевой авторегрессионной модели. Сложность данной задачи заключается в том, что динамические характеристики объекта управления могут существенно меняться. Данные о движении по пространственной траектории беспилотного транспортного средства для обучающей выборки были получены в Робототехническом центре ФИЦ ИУ РАН. Параметры модели были найдены методом роя частиц. С помощью идентифицированной модели экспериментально были сравнены методы управления в реальном времени. Управление осуществлялось на основе ПИД-регулятора, метода прогнозного управления и идентификатора на основе искусственных нейронных сетей. В сравнительном эксперименте для более точной оценки метода идентификации модель была подвергнута случайным воздействиям, траектория движения объекта управления была существенно усложнена.

**Ключевые слова:** идентификация, беспилотное транспортное средство, отслеживание траектории.

**Abstract.** This paper presents the results of nonlinear model identification of an unmanned vehicle in the Gazebo simulator based on a neural network autoregressive model. The dynamic characteristics of the control object can vary significantly that complicates the problem. Data on the movement along the spatial path of an unmanned vehicle for the training sample was obtained at the Robotics Center of the FRC CSC RAS. The model parameters were found by the particle swarm optimization method. Using the identified model, real-time control methods were experimentally compared. Control was carried out on the basis of the PID controller, model predictive control method and identifier based on artificial neural networks. In a comparative experiment, for a more accurate assessment of the identification method, the model was subjected to random disturbances, and the tracking path of the control object was significantly complicated.

**Keywords:** identification, unmanned vehicle, path tracking.

### Введение

Управление беспилотными транспортными средствами (БТС) из начального состояния в конечное должно обеспечивать требуемые показатели качества этого управления. При этом предъявляются требования синтезировать законы управления, обеспечивающие достижение цели управления в широком классе неопределенности динамики БТС. Для синтеза требуемых законов управления нам необходимо осуществить этап моделирования системы управления БТС. Математический аналог реальной системы можно получить с помощью известных методов идентификации [1, 2]. Данное исследование основывается на методах идентификации систем, таких как ARMAX (модели авторегрессивного скользящего среднего с экзогенными входами) и NARMAX (нелинейный ARMAX). Эти методы производят линейные и нелинейные полиномиальные функции, которые моделируют взаимосвязь между восприятием сенсора робота и моторной реакцией. Данные методы распространяются на нейросетевые структуры [3, 4] и применяются для нелинейного БТС.

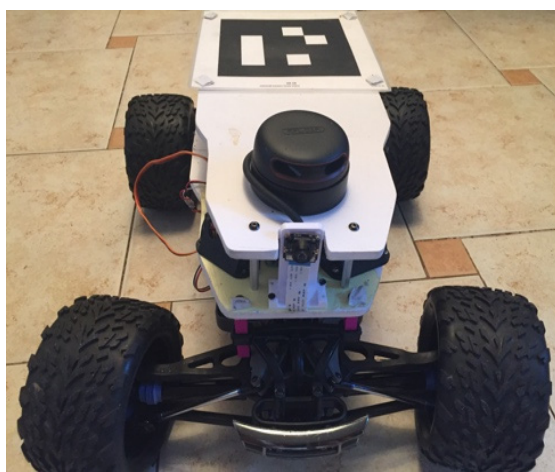
Широкий спектр исследований в области мобильных систем БТС в автоматическом режиме направлен на разработку нелинейного закона управления для отслеживания траекторий в режиме реального времени [5].

Управление беспилотными транспортными средствами в реальном времени для отслеживания траектории разбивается, как правило, на три подзадачи: генерацию траектории, определение положения и отслеживание траектории.

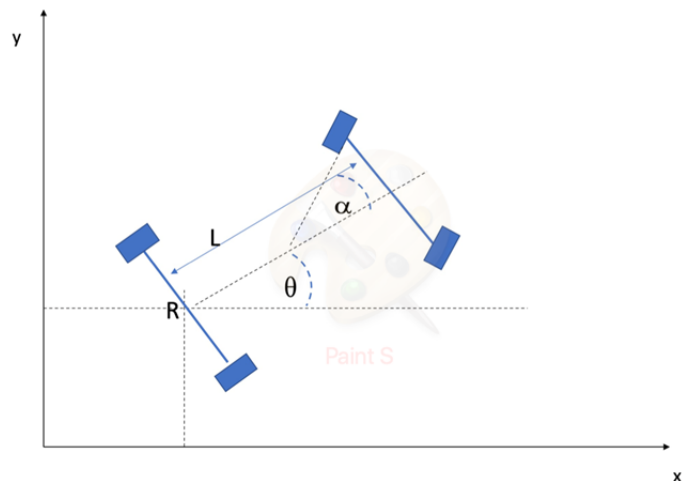
В настоящей работе приведены результаты и показана возможность идентификации беспилотного транспортного средства в симуляторе Gazebo [6, 7] на основе нейросетевой авторегрессионной модели и экспериментально сравнены методы управления в реальном времени на примере решения задачи управления движением БТС по пространственной траектории. В сравнительном эксперименте для более точной оценки метода идентификации в модель включены случайные возмущения и усложнена траектория движения.

### Идентификация модели беспилотного транспортного средства

Беспилотное транспортное средство построено на базе автомобильного шасси в масштабе 1:10, имеет вес 1,5 кг и может развивать скорость до 10 м/с. Внешний вид БТС представлен на рис. 1,а. Передние колеса БТС реализуют рулевое управление, задние колеса отслеживают состояние. На рис. 1,б приведена кинематическая схема управления движением БТС, где  $x, y$  – координаты;  $\alpha$  – угол поворота передних колес;  $\theta$  – ориентация БТС относительно оси  $x$ ;  $L$  – расстояние между передней и задней осями робота;  $R$  – базовая точка, расположенная по середине задней оси робота.



а)



б)

Рис. 1. БТС и кинематическая схема управления движением

Измерение локальных координат движения БТС проводилось в Робототехническом центре ФИЦ ИУ РАН [8].

Сформулируем задачу идентификации как задачу оценивания параметров математической модели, которая обладает существенными чертами реальной системы и передает ее динамические свойства. Основу метода идентификации системы с динамическим объектом составляет реализация процедуры идентификации с использованием регрессионных математических форм.

Прогнозирование величины выхода  $y(t)$  на основе информации, полученной при измерении других величин  $\varphi_i$ ,  $i = \overline{1, d}$ , содержащих информацию о прошлом поведении системы, является задачей регрессии.

Для БТС, в том числе изображенного на рис. 1,а, идентификацию можно выразить в нахождении такой функции  $g(\varphi)$ , чтобы оценка этой функции  $\hat{y}(k) = g(\varphi)$  удовлетворяла установленному критерию и была следующим шагом  $k$  величины  $y(k)$ . Функция регрессии  $g(\varphi)$  оценивается по экспериментальным данным  $Z^L$ ,  $k = \overline{1, L}$ , и  $g(\varphi) = g(\varphi, \mathbf{q})$ , где  $\mathbf{q}$  – вектор настраиваемых параметров,  $Z^L = \{u(k), y(k)\}$  – количество экспериментальных данных во всем рабочем диапазоне БТС. Для нашей системы это переменные состояния: продольная скорость, поперечная скорость, скорость

движения, рулевое управление и управление скоростью и производные по времени от переменных состояния. Качество идентификации зависит от достоверности и репрезентативности экспериментальных данных.

Динамический объект может быть выражен в следующем виде:

$$\tilde{y}(k, q) = g(\varphi(k, \mathbf{q}), \mathbf{q}). \quad (1)$$

Модель динамики модели БТС была реализована на нейросетевой модельной структуре, имеющей следующую математическую форму:

$$g_i(\varphi(k, \mathbf{q}), \mathbf{q}) = \hat{y}_i(k | \mathbf{q}) = \hat{y}_i(k | w, W) = F_i \left( \sum_{j=1}^{n_h} W_{ij} f_j \left( \sum_{l=1}^{n_\phi} w_{jl} \varphi_l + w_{j0} \right) + W_{i0} \right), \quad (2)$$

где  $\mathbf{q}$  – настраиваемые параметры нейронной сети, включающие весовые коэффициенты и смещения ( $w_{jl}, W_{ij}$ );  $F_i(x) = ax$  – функция активации нейронов выходного слоя,  $a = \text{const}$ ;  $n_h$  – число нейронов в скрытом слое;  $f_j(x) = \tanh(x)$  – функция активации нейронов скрытого слоя;  $n_\phi$  – число входов. На вход обученной нейронной сети подаются переменные состояния, такие как продольная скорость, поперечная скорость, скорость движения, рулевое управление и управление скоростью и производные по времени от переменных состояния.

Модель кинематики БТС может быть реализована на следующей модельной структуре. Конечно-разностные уравнения модели мобильного робота имеют следующий вид:

$$\mathbf{x}(k+1) = \begin{bmatrix} x(k+1) \\ y(k+1) \\ \theta(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x(k) + v(k)q_1 \sin(\theta(k)) \\ y(k) + v(k)q_1 \sin(\theta(k)) \\ \theta(k) + v(k)q_1 \tan(\alpha(k))q_2 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где  $\mathbf{x}(k)$  – вектор состояния объекта:

$$\mathbf{x}(k) = [x(k), y(k), \theta(k), v(k), \alpha(k)]^T, \quad (4)$$

$v(k)$  – скорость движения робота,  $\mathbf{q}$  – вектор идентифицируемых параметров модели:

$$\mathbf{q} = [q_1, q_2]^T. \quad (5)$$

При использовании конечно-разностного уравнения (3) оптимизация параметров  $\mathbf{q}$  представляет собой отображение множества экспериментальных данных на множество параметров модели (3). Критерием оптимальности является среднеквадратичная ошибка прогнозирования (1)

$$\sigma_L(\mathbf{q}, Z^L) = \frac{1}{2L} \sum_{k=1}^L (y(k) - \hat{y}(k | \mathbf{q}))^2. \quad (6)$$

Идентификация заключается в автоматическом поиске параметров модели (3) и весовых коэффициентов нейронной сети (2) и в нахождении вектора параметров (5), минимизирующего критерий (6)

$$\hat{\mathbf{q}} = \arg \min_{\mathbf{q}} \sigma_L(\mathbf{q}, Z^L). \quad (7)$$

Для нахождения вектора оптимальных параметров в ИНС использовался стохастический градиентный спуск с Adam [9].

Для нахождения вектора оптимальных параметров модели кинематики (3) используется метод оптимизации роя частиц (PSO) [10]

$$\begin{aligned} q_{k+1}^i &= q_k^i + v_{k+1}^i, \\ v_{k+1}^i &= w_k v_k^i + c_1 r_1 (p_k^i - q_k^i) + c_2 r_2 (p_k^g - q_k^i), \end{aligned} \quad (8)$$

где  $q_k^i$  – величина параметра,  $k$  – текущая итерация,  $v_k^i$  – величина и направление вектора скорости каждого параметра,  $w_k$  – постоянный вес,  $c_1, c_2$  – параметры ускорения,  $r_1, r_2$  – случайные числа

от 0 до 1,  $p_k^i$  – лучшая найденная точка варианта параметра,  $p_k^g$  – лучшая найденная точка всех вариантов параметра.

После вычисления направления вектора  $v$  параметр перемещается в точку  $q_{k+1}^i$ . В случае необходимости обновляются значения лучших точек для каждого параметра и для всех параметров в целом. После этого цикл повторяется.

Для сбора необходимого количества данных во всем рабочем диапазоне управления БТС использовалась система SLAM на основе 2d Lidar (RPLIDAR A2M8). Данные вектора управления и состояния были записаны с частотой 50 Гц.

В результате моделирования были получены следующие параметры:

$$\hat{q} = [0,019; 0,01]^T,$$

удовлетворяющие (7) с ошибкой  $\varepsilon < 0,002$ .

На рис. 2 показано моделирование идентифицируемой модели и экспериментальных данных канала поперечного управления БТС  $\theta$ . На рисунке пунктирной линией обозначен идентифицируемый выход, сплошной линией – полученные экспериментальные данные управления  $y(t)$  при изменении линейной скорости.

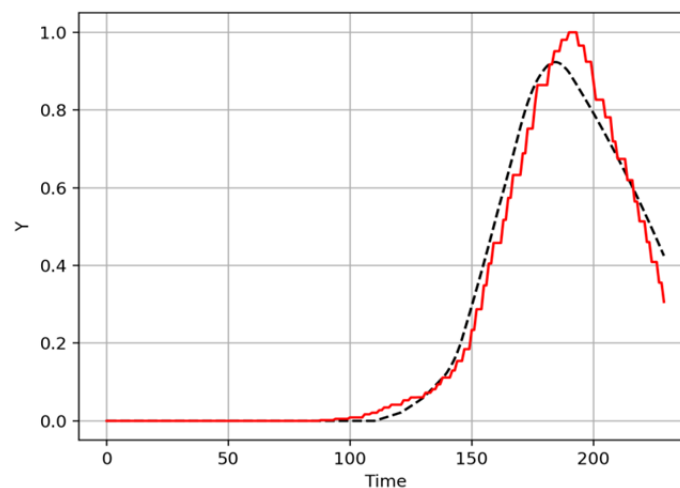


Рис. 2. Сравнение идентифицированной модели и экспериментальных данных

На рис. 3 показан график отклика канала поперечного управления БТС, т.е. ориентации БТС, на входное управление  $\alpha$  при  $v(k) = \text{const}$ , график идентифицированной модели БТС, а также график самого управления.

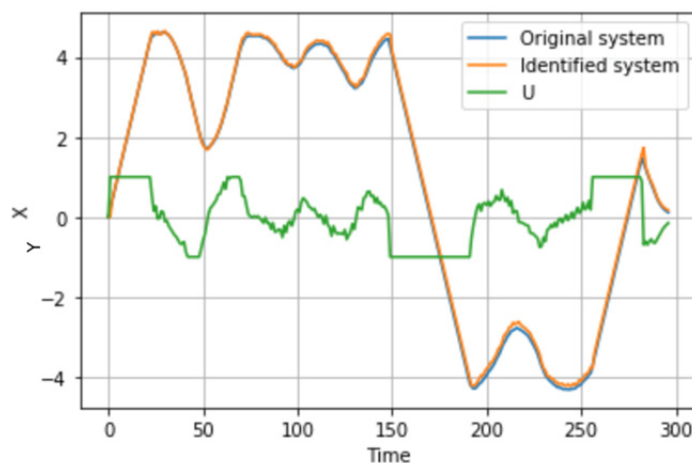


Рис. 3. Управление и отклик исходной и идентифицированной моделей

### Задача синтеза управления движением вдоль пространственной траектории

В формальной постановке задачи синтеза управления [11] движением по пространственной траектории математическая модель объекта управления задается в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений  $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u})$ , где  $\mathbf{x}$  – вектор состояния объекта,  $\mathbf{u}$  – вектор управления,  $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^n$ ,  $\mathbf{u} \in U \subseteq \mathbf{R}^m$ , множество  $U$  замкнуто и ограничено,  $m \leq n$ . Заданы начальное состояние объекта управления, пространственная траектория движения в виде  $n-r$ -мерных многообразий и время окончания процесса управления  $t_f$ . Траектория движения не зависит от времени. Решением задачи синтеза является функция управления, зависящая от координат пространства состояний  $\mathbf{u} = \mathbf{h}(\mathbf{x})$ ,  $\mathbf{h}(\mathbf{x}): \mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R}^m$ , при  $\forall \mathbf{x} \in \mathbf{R}^n$ ,  $\mathbf{h}(\mathbf{x}) \in U$ , и обеспечивающая минимум критерия качества, например, минимум отклонения от траектории

$$J = \frac{1}{t_f r} \int_0^{t_f} \sqrt{\sum_{i=1}^r \varphi_i(\mathbf{x}(t))} dt \rightarrow \min.$$

Для решения задачи синтеза системы управления движением объекта по пространственной траектории используем ПИД-регулятор, прогнозное управление [12, 13] и аппарат искусственных нейронных сетей (ИНС) [3, 4, 14].

Для исследования предложенных подходов разработана среда моделирования БТС, построенная с использованием Gazebo ROS и основанная на динамике робота.

### Схема отслеживания траектории

Желаемую траекторию задаем в виде последовательности точек на плоскости или в трехмерном пространстве в зависимости от задачи. Структурная схема системы управления БТС с использованием ПИД-регулятора, прогнозного управления идентификатора, основанного на нейронной сети и уравнений (3), представлена на рис. 4.

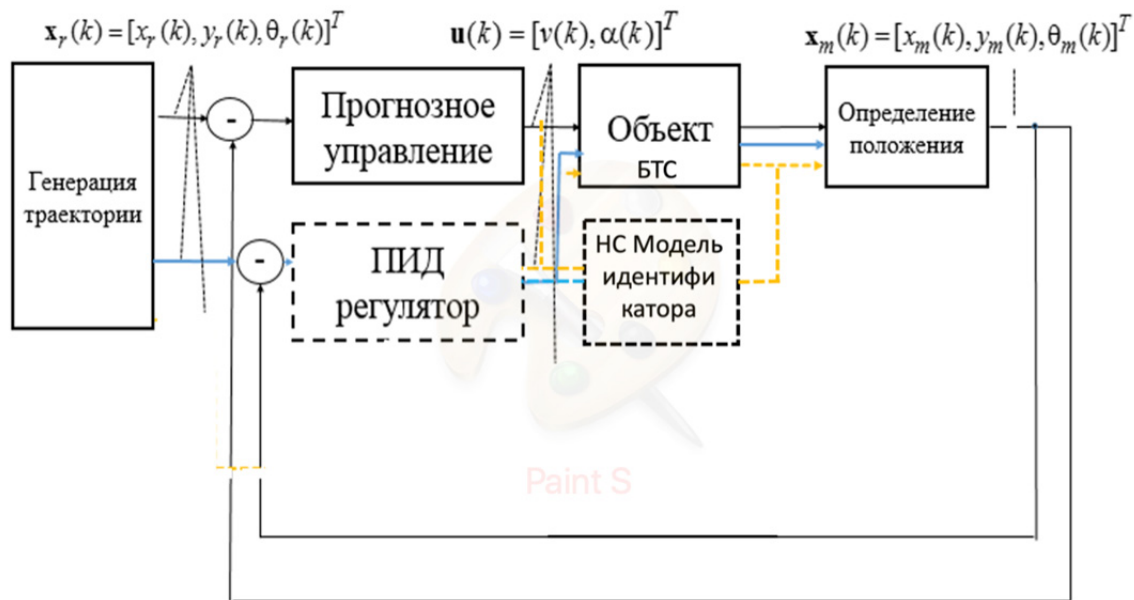


Рис. 4. Обобщенная схема системы управления

На рис. 4 отмечены: желаемая траектория  $\mathbf{x}_r(k) = [x_r(k), y_r(k), \theta_r(k)]^T$  и измеренная траектория движения реального объекта  $\mathbf{x}_m(k) = [x_m(k), y_m(k), \theta_m(k)]^T$ .

В качестве желаемой траектории движения была использована траектория с перекрещиванием, одна из фигур Лиссажу

$$x^*(\tau) = \sin(a\tau), \quad y^*(\tau) = \sin(b\tau), \quad a = 1, \quad b = 2. \quad (9)$$

Используем кубический сплайн для аппроксимации траектории. В общем виде аппроксимацию на интервале  $i$  определяем из соотношений

$$S_i(x^*) = a_{0,i} + a_{1,i}(x^* - x_i^*) + a_{2,i}(x^* - x_i^*)^2 + a_{3,i}(x^* - x_i^*)^3, \quad (10)$$

$$R_i(y^*) = b_{0,i} + b_{1,i}(y^* - y_i^*) + b_{2,i}(y^* - y_i^*)^2 + b_{3,i}(y^* - y_i^*)^3, \quad (11)$$

где  $(x_i^*, y_i^*)$  – координаты точки  $i$  на траектории в плоскости  $X \times Y$ ,  $i = \overline{1, N}$ .

## Контроллеры

### Управление с обратной связью

В качестве обратной связи по заданной скорости рассмотрим ПИД-регулятор, получающий ошибку по отклонению реального движения от заданной скорости. В общем случае ПИД-регулятор имеет вид

$$y = k_1 e(t) + k_2 \int_0^t e(t) dt + k_3 \dot{e}(t),$$

где  $e(t)$  – отклонение желаемого сигнала от реального,  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  – коэффициенты звеньев регулятора,  $y$  – управляющий сигнал, поступающий на объект.

Качество управления определяется величиной перерегулирования, временем переходного процесса и статической ошибкой.

В контуре рулевого управления БТС был использован ПИД-регулятор. Управляющие воздействия на БТС имели следующий вид:

$$\alpha = \arctan \frac{Lw}{v}, \quad (12)$$

где  $L$  – расстояние между осями робота;  $v$  и  $w$  – линейная и угловая скорости движения робота,

$$w = \frac{vk(s) \cos(\theta_e)}{1 - k(s)e} - k_\theta |v| \theta_e - (k_e v \frac{\sin(\theta_e)}{\theta_e}) e, \quad (13)$$

$k(s)$  – кривизна пути;  $\theta_e$  – ошибка направления движения;  $e$  – ошибка по положению;  $k_\theta$ ,  $k_e$  – коэффициенты регулятора.

На рис. 5 представлены результаты моделирования применения ПИД-регулятора, что позволило отследить желаемую траекторию с минимальной среднеквадратической ошибкой (МСО). Красной линией показана желаемая траектория, а зеленой линией – отслеженная.

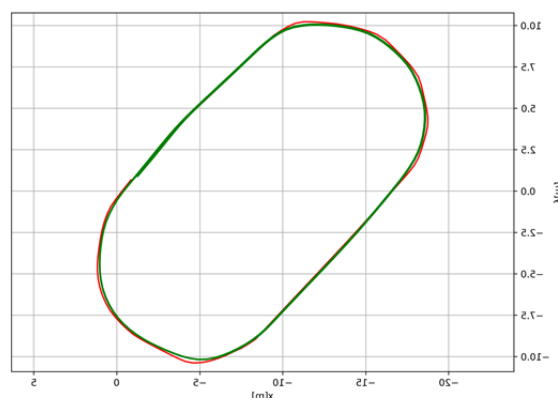


Рис. 5. Результаты моделирования применения ПИД-регулятора

### Прогнозное управление

Прогнозное управление переопределяет собой оптимизационную стратегию, обладающую рядом преимуществ, таких как учет ограничений на состояние системы и на управляющие сигналы, работа с нелинейными объектами.

Решением задачи оптимизации является оптимальная траектория. Прогнозное управление включает в себя моделирование различных входов объекта, прогнозирование итоговой траектории и выбор этой траектории по одному или нескольким критериям, например,

$$J = \sum_{i=1}^L w_{x_i} (r_i - x_i)^2 + \sum_{i=1}^L w_{u_i} \Delta u_i^2 \rightarrow \min, \quad (14)$$

где  $w_{x_i}$ ,  $w_{u_i}$  – весовые коэффициенты;  $r_i$  – желаемая траектория;  $x_i$  – управляемая переменная;  $u_i$  – управление.

Цель прогнозного управления заключается в нахождении на каждом шаге оптимального управления для некоторого временного интервала, называемого горизонтом управления. Применяется только первый найденный шаг из стратегии

$$K(x_k) = u_{k+1}(x_k), \quad (15)$$

далее происходят сдвиг горизонта прогнозирования и новая оптимизация. Проведение оптимизации на каждом шаге в режиме онлайн стало возможным благодаря доступности высокопроизводительных вычислительных средств на борту БТС.

Для модели объекта управления (3) и значения горизонта прогнозирования, равного (8), желаемая и полученная траектории приведены на рис. 6.

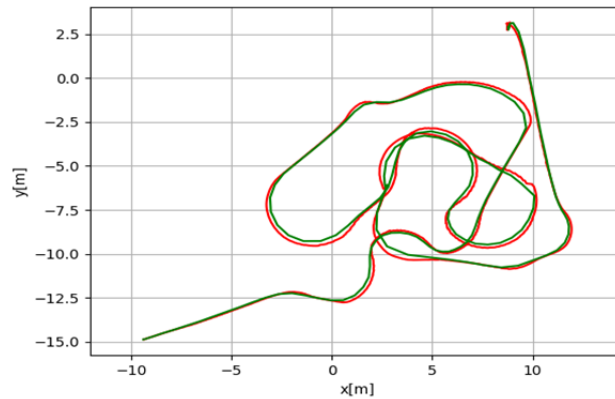


Рис. 6. Предсказанная по модели и экспериментальная траектории

### Нейросетевое управление с прогнозирующей моделью

Искусственная нейронная сеть используется в качестве модели объекта управления. Схема нейросетевого управления на основе прогнозирующей модели приведена на рис. 7.

Концепция прогнозирующего управления состоит в определении управляющего сигнала на каждой итерации посредством минимизации критерия

$$J = \sum_{i=N_{\min}}^{N_{\max}} [r(k+i) - \hat{y}(k+i|k)]^2 + \beta \sum_{i=1}^{N_u} [\Delta u(k+i-1)]^2 \rightarrow \min, \quad (16)$$

$$\Delta u(k+i-1) = u(k+i) - u(k+i-1), \Delta u(k+i) = 0, N_u \leq i \leq N_{\max} - d, u_{\min} \leq u(k) \leq u_{\max},$$

где  $d$  – время задержки в системе,  $N_{\min}$  – минимальный горизонт прогнозирования,  $N_{\max}$  – максимальный горизонт прогнозирования.

Прогнозирующая модель  $g(\varphi(k, \mathbf{q}), \mathbf{q})$  может быть реализована на нейросетевой модельной структуре, имеющей следующее математическое представление:

$$g_i(\varphi(k, \mathbf{q}), \mathbf{q}) = \hat{y}_i(k|\mathbf{q}) = \hat{y}_i(k|w, W) = F_i \left( \sum_{j=1}^{n_h} W_{ij} f_j \left( \sum_{l=1}^{n_\varphi} w_{jl} \varphi_l + w_{j0} \right) + W_{i0} \right), \quad (17)$$

где  $\mathbf{q}$  – вектор настраиваемых параметров нейронной сети, включающий весовые коэффициенты и нейронные смещения ( $w_{jl}, W_{ij}$ );  $F_i(x) = ax$ ;  $a = \text{const}$  – активационная функция нейронов выходного слоя;  $n_h$  – число нейронов в скрытом слое;  $n_\varphi$  – размерность регрессионного вектора (число входов ИНС);  $f_j(x) = \tanh(x)$  – активационная функция нейронов скрытого слоя.

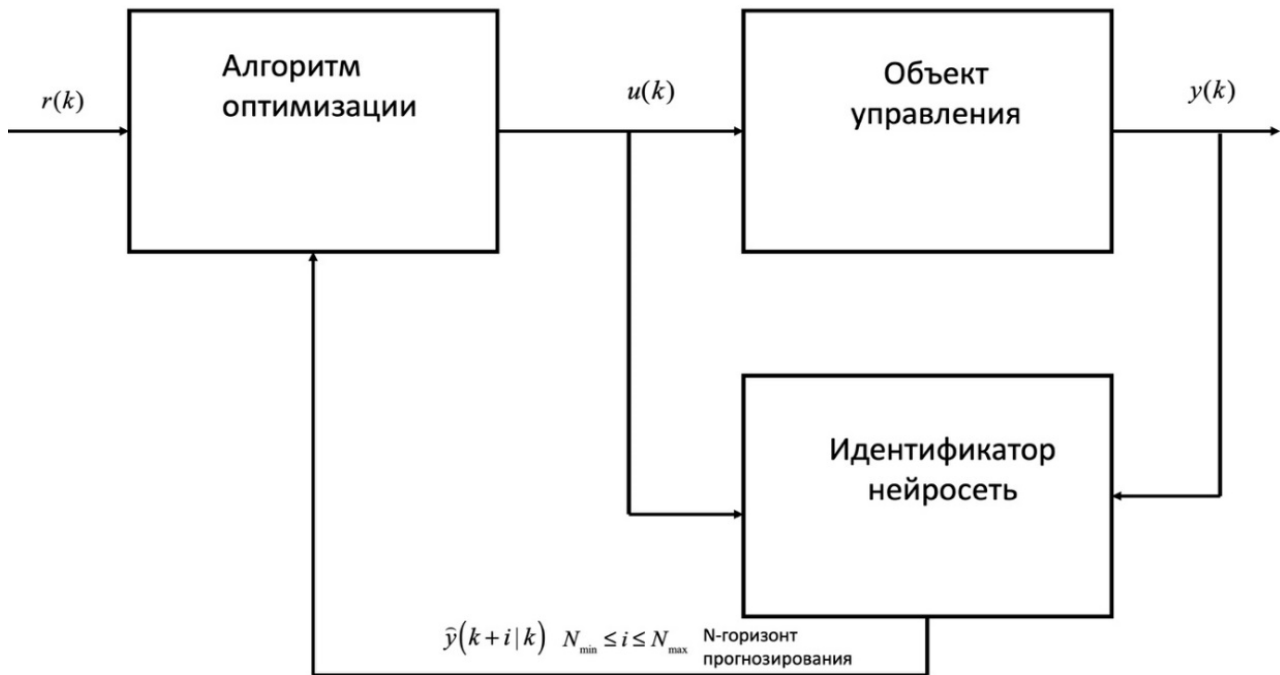


Рис. 7. Схема управления с прогнозирующей моделью с идентификатором динамики на основе нейронной сети

Для синтеза закона управления для нахождения минимума (16) используются методы последовательного приближения, или итеративные методы поиска:

$$\mathbf{U}_{k+1} = \mathbf{U}_k + \eta_k \mathbf{d}_k, \quad (18)$$

где  $\mathbf{U}_k$  – вектор управляющих сигналов на  $k$ -й итерации;  $\eta_k$  – шаг алгоритма и  $\mathbf{d}_k$  – направление поиска.

Направление поиска методом Ньютона с подходом Левенберга – Марквардта [15–17] определяется из следующего уравнения:

$$[\mathbf{H}(\mathbf{U}_k(t)) + \lambda_k \mathbf{I}] \mathbf{d}_k = -\mathbf{g}(\mathbf{U}_k(t)),$$

где

$$\begin{aligned} \mathbf{g}(\mathbf{U}_k(t)) &= \left. \frac{\partial J(\mathbf{U}(t), t)}{\partial \mathbf{U}(t)} \right|_{\mathbf{U}(t)=\mathbf{U}_k(t)} = \left[ -2 \left[ \frac{\partial \hat{\mathbf{Y}}(t)}{\partial \mathbf{U}(t)} \right]^T E(t) + 2\rho \left[ \frac{\partial \tilde{\mathbf{U}}(t)}{\partial \mathbf{U}(t)} \right]^T \tilde{\mathbf{U}}(t) \right]_{\mathbf{U}(t)=\mathbf{U}_k(t)} = \\ &= \left[ -2\boldsymbol{\Psi}^T(\mathbf{U}(t)) E(t) + 2\rho \left[ \frac{\partial \tilde{\mathbf{U}}(t)}{\partial \mathbf{U}(t)} \right]^T \tilde{\mathbf{U}}(t) \right]_{\mathbf{U}(t)=\mathbf{U}_k(t)}, \end{aligned}$$

$$\mathbf{H}(\mathbf{U}_k(t)) = \frac{\partial J^2(\mathbf{U}(t), t)}{\partial \mathbf{U}(t)^2} \bigg|_{\mathbf{U}(t)=\mathbf{U}_k(t)} = \left[ -2 \frac{\partial \left( \left[ \frac{\partial \hat{\mathbf{Y}}(t)}{\partial \mathbf{U}(t)} \right]^T E(t) \right)}{\partial \mathbf{U}(t)} + 2\rho \left[ \frac{\partial \tilde{\mathbf{U}}(t)}{\partial \mathbf{U}(t)} \right]^T \left[ \frac{\partial \tilde{\mathbf{U}}(t)}{\partial \mathbf{U}(t)} \right] \right] \bigg|_{\mathbf{U}(t)=\mathbf{U}_k(t)}.$$

Для реализации контроллера, основанного на идентификаторе ИНС, на первом этапе собрали данные для обучения в ручном режиме.

Минимальный прогнозирующий горизонт был равен временной задержке, максимальный прогнозирующий горизонт по эмпирическому правилу приближенно был равен времени переходного процесса системы.

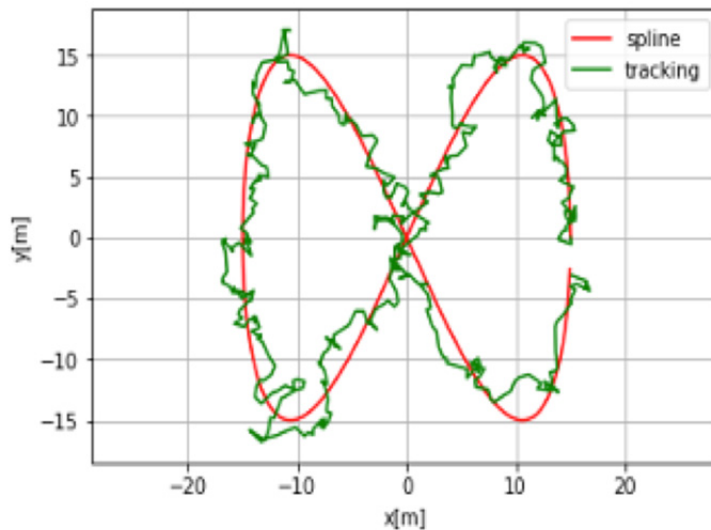


Рис. 8. Отслеживание траектории при неопределенности с помощью ПИД-регулятора

Было проведено экспериментальное сравнение результатов двух широко применяемых методов управления движением беспилотного транспортного средства по траектории в реальном времени. Управление осуществлялось на основе ПИД-регулятора, метода прогнозного управления в симуляторе Gazebo ROS с реальной динамикой БТС. В результате работы была исследована процедура предложенного метода идентификации с моделью нейронной сети и оптимизации параметров метода роя частиц.

Для каждого из методов выполнялись следующие эксперименты: движение объекта по заданной относительно простой траектории, движение объекта управления со случайным воздействием на модель и движение объекта по заведомо сложной траектории.

В первом эксперименте при движении объекта по заданной относительно простой траектории полученные при моделировании графики представлены на рис. 5, 6. Значения среднеквадратических ошибок приведены в табл. 1. Среднее время вычислений управления на каждом шаге составило  $T_{\text{ПИД-рег}} = 0,0022$  с,  $T_{\text{ПУ}} = 1,12$  с. Соотношение по времени вычислений между методами для всех последующих экспериментов сохранялось.

Таблица 1

Результаты вычислительного эксперимента

| МСО                      | ПИД-рег. | ПУ     |
|--------------------------|----------|--------|
| Координата $x$           | 0,0124   | 0,0016 |
| Координата $y$           | 0,0329   | 0,0058 |
| Угол ориентации $\theta$ | 0,0020   | 0,0368 |

Во втором эксперименте в модель объекта управления была добавлена неопределенность

$$\mathbf{x}(k+1) = \begin{bmatrix} x(k+1) \\ y(k+1) \\ \theta(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x(k) + v(k)q_1 \sin(\theta(k)) + \xi(k) \\ y(k) + v(k)q_1 \sin(\theta(k)) + \xi(k) \\ \theta(k) + v(k)q_1 \tan(\alpha(k))q_2 \end{bmatrix}, \quad (19)$$

где  $\xi(k)$  – случайная величина с нормальным распределением и стандартным отклонением 0,7. Графики, полученные при моделировании, представлены на рис. 8, 9. Значения среднеквадратических ошибок приведены в табл. 2.

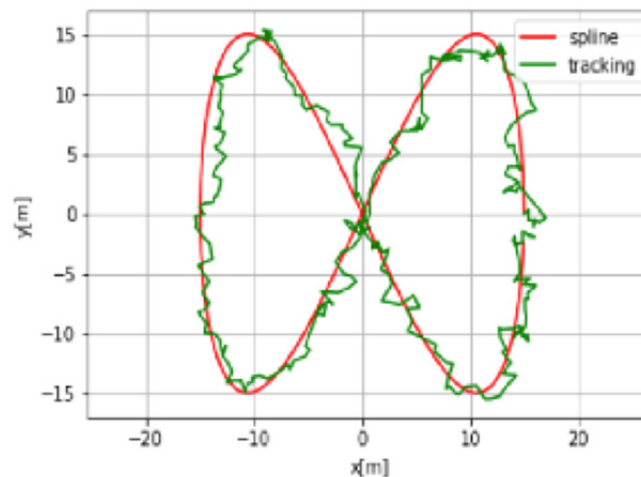


Рис. 9. Отслеживание траектории при неопределенности с помощью прогнозного управления

Таблица 2

Результаты среднеквадратических ошибок вычислительного эксперимента при неопределенности

| МСО                      | ПИД-рег. | ПУ     |
|--------------------------|----------|--------|
| Координата $x$           | 1,1459   | 0,7597 |
| Координата $y$           | 0,8247   | 0,4194 |
| Угол ориентации $\theta$ | 0,2356   | 0,1565 |

В третьем эксперименте геометрия траектории была изменена так, чтобы объект заведомо не мог двигаться по траектории точно из-за имеющихся ограничений на управление. Графики, полученные при моделировании движения по сложной траектории, представлены на рис. 10, 11. Значения среднеквадратических ошибок приведены в табл. 3.

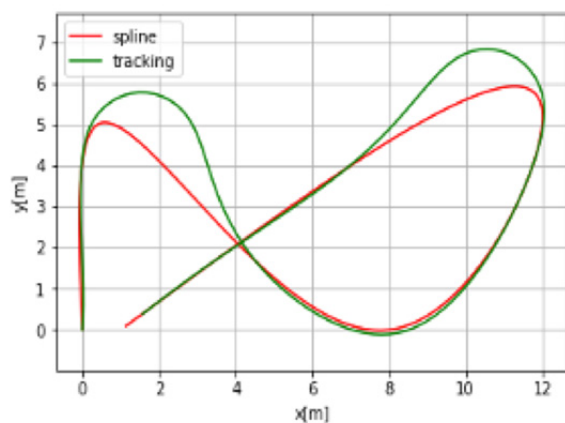


Рис. 10. Отслеживание сложной траектории с помощью ПИД-регулятора

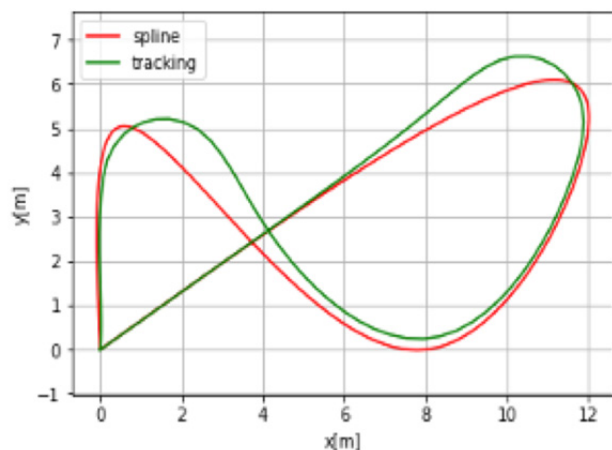


Рис. 11. Отслеживание сложной траектории с помощью прогнозного управления

Таблица 3

Результаты вычислительного эксперимента при сложной траектории

| МСО                      | ПИД-рег. | ПУ     |
|--------------------------|----------|--------|
| Координата $x$           | 0,1053   | 0,0385 |
| Координата $y$           | 0,1333   | 0,0797 |
| Угол ориентации $\theta$ | 0,0363   | 0,1410 |

При проведении экспериментов фиксировались рулевые управления во времени. Графики полученных рулевых управлений приведены на рис. 12, 13.

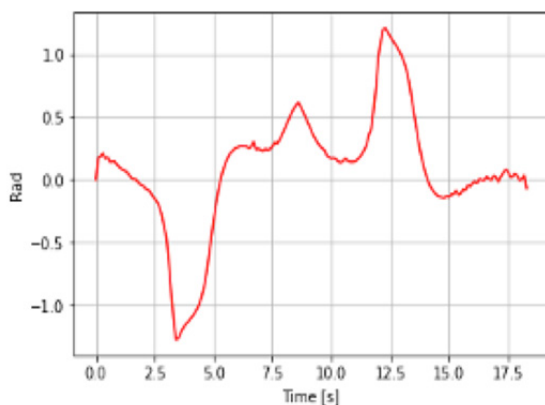


Рис. 12. Рулевое управление, полученное с помощью ПИД- регулятора

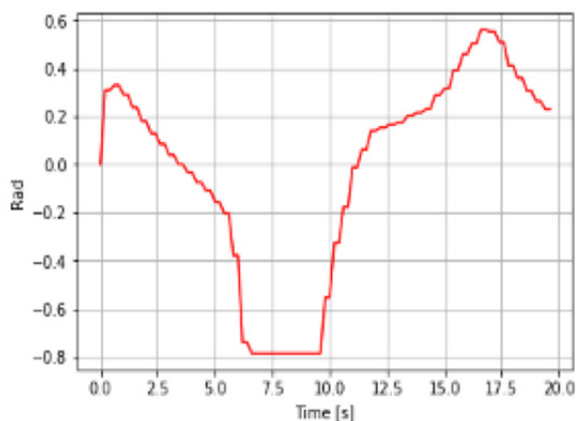


Рис. 13. Рулевое управление, полученное с помощью прогнозного управления

### Заключение

В результате работы была проверена процедура предложенного метода идентификации БТС с нейросетевой моделью и оптимизации параметров методом роя частиц. Идентификационная модель была использована в экспериментальном сравнении результатов двух методов управления движением беспилотного транспортного средства по траектории в реальном времени. Управление осуществлялось на основе ПИД-регулятора, метода прогнозного управления и идентификатора на основе искусственных нейронных сетей.

Для каждого из методов были выполнены следующие эксперименты: движение объекта по заданной относительно простой траектории, движение объекта управления со случайным воздействием на модель и движение объекта по заведомо сложной траектории.

В результате моделирования методы обеспечили достаточно точное движение БТС по простой и сложной траекториям, однако время вычисления управления для метода прогнозного управления было в 500 раз больше (при реализации оптимизатора на CPU). В реальном БТС управляющие команды не выполняются мгновенно, а происходит задержка, например, из-за динамики привода.

По значению среднеквадратических ошибок лучшие результаты показал метод прогнозного управления. ПИД-регулятор показывал приблизительно одинаковые результаты, при небольшой скорости, по сравнению с контроллером, на основе прогнозного управления, при увеличении скорости прогнозное управление справляется с задержками и проскальзыванием колес, а ПИД-регулятор становится неустойчивым при скорости более 5 м/с, что в два раза хуже прогнозного управления.

*Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ, проект № 18-29-03061-мк, результаты главы 2 получены при поддержке РНФ, проект № 19-11-00258.*

### Библиографический список

1. Льюнг, Л. Идентификация систем / Л. Льюнг. – Москва : Наука, 1991. – 432 с.
2. Пупков, К. А. Статистические методы анализа, синтеза и идентификации нелинейных систем автоматического управления / К. А. Пупков, Н. Д. Егупов, А. И. Трофимов. – Москва : МГТУ им. Баумана, 1998. – 562 с.

3. Круглов, В. В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика / В. В. Круглов, В. В. Борисов. – Москва : Горячая линия – Телеком, 2002. – 382 с.
4. Рутковская, Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский. – Москва : Горячая линия – Телеком, 2004. – 452 с.
5. A Survey of Motion Planning and Control Techniques for Self-driving Urban Vehicles / B. Paden, M. Cáp, S. Z. Yong, D. Yershov, E. Frazzoli // IEEE Transaction on intelligent vehicles. – 2016. – DOI 10.1109/TIV.2016.257806.КорпусID:1229096
6. Fairchild, C. ROS Robotics By Example / C. Fairchild, T. L. Harman. – Packt Publishing, 2016.
7. Gazebo. – URL: <http://gazebo-sim.org/>
8. Дарьина, А. Н. Робототехнический центр ФИЦ ИУ РАН / А. Н. Дарьина, А. И. Дивеев, И. В. Прокопьев // Вопросы теории безопасности и устойчивости систем. – 2019. – Вып. 21. – С. 66–77.
9. Kingma, D. P. A Method for Stochastic Optimization / D. P. Kingma, J. A. Ba // 3rd International Conference for Learning Representations. arXiv:1412.6980v8 [cs.LG]. – San Diego, 2015. – 15 p. – URL: <https://arxiv.org/pdf/1412.6980v8.pdf>
10. Lindfield, G. Particle Swarm Optimization Algorithms // Introduction to Nature-Inspired Optimization / ed. by George Lindfield, John Penny. – Academic Press, 2017. – P. 49–68. – URL: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803636-5.00003-7>.
11. Дивеев, А. И. Синтез системы управления – задача тысячелетия / А. И. Дивеев, К. А. Пупков, Е. А. Софронова // Вестник РУДН, Сер.: Инженерные исследования. – 2011. – № 2. – С. 113–125.
12. Mehta, B. R. Advanced process control systems // Industrial Process Automation Systems / ed. by B. R. Mehta, Y. J. Reddy. – Butterworth-Heinemann, 2015. – P. 547–557. – URL: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800939-0.00019-X>
13. Huang, B. Dynamic Modeling, Predictive Control and Performance Monitoring: A Data-driven Subspace Approach, Lecture Notes in Control and Information Sciences / B. Huang, R. Kadali. – Springer, 2008. – 241 p.
14. Pham, D. Neural Networks for Identification, Prediction and Control / D. Pham, X. Liu. – Springer, 1995. – 238 p.
15. Marquardt, D. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters / D. Marquardt // SIAM J. Appl. Math. – 1963. – № 11. – P. 164–168.
16. Levenberg, K. A Method for the solution of certain nonlinear problems in least squares / K. Levenberg // Quart. Appl. Math. – 1944. – № 2. – P. 164–168.
17. Broyden, C. G. Quasi-Newton methods and their applications to function minimization / C. G. Broyden // Journal of the American Mathematical Community. – 1967. – Vol. 21. – P. 368–381.

### References

1. L'yung L. *Identifikatsiya sistem* [System identification]. Moscow: Nauka, 1991, 432 p. [In Russian]
2. Pupkov K. A., Egupov N. D., Trofimov A. I. *Statisticheskie metody analiza, sinteza i identifikatsii nelineynykh sistem avtomaticheskogo upravleniya* [Statistical methods for analysis, synthesis, and identification of nonlinear automatic control systems]. Moscow: MGTU im. Bauman, 1998, 562 p. [In Russian]
3. Kруглов В. В., Борисов В. В. *Iskusstvennye neyronnye seti. Teoriya i praktika* [Artificial neural network. Theory and practice]. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2002, 382 p. [In Russian]
4. Rutkovskaya D., Piliński M., Rutkovskiy L. *Neyronnye seti, geneticheskie algoritmy i nechetkie sistemy* [Neural networks, genetic algorithms, and fuzzy systems]. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2004, 452 p. [In Russian]
5. Paden B., Cáp M., Yong S. Z., Yershov D., Frazzoli E. *IEEE Transaction on intelligent vehicles*. 2016. DOI 10.1109/TIV.2016.257806.КорпусID:1229096
6. Fairchild C., Harman T. L. *ROS Robotics By Example*. Packt Publishing, 2016.
7. Gazebo. Available at: <http://gazebo-sim.org/>
8. Dar'ina A. N., Diveev A. I., Prokop'ev I. V. *Voprosy teorii bezopasnosti i ustoychivosti sistem* [Questions of the theory of security and stability of systems]. 2019, iss. 21, pp. 66–77. [In Russian]
9. Kingma D. P., Ba J. A. *3rd International Conference for Learning Representations*. arXiv:1412.6980v8 [cs.LG]. San Diego, 2015, 15 p. Available at: <https://arxiv.org/pdf/1412.6980v8.pdf>
10. Lindfield G. *Introduction to Nature-Inspired Optimization*. Academic Press, 2017, pp. 49–68. Available at: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803636-5.00003-7>.
11. Diveev A. I., Pupkov K. A., Sofronova E. A. *Vestnik RUDN, Ser.: Inzhenernye issledovaniya* [RUDN Bulletin, Ser.: Engineering research]. 2011, no. 2, pp. 113–125. [In Russian]
12. Mehta B. R. *Industrial Process Automation Systems*. Butterworth-Heinemann, 2015, pp. 547–557. Available at: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800939-0.00019-X>
13. Huang B., Kadali R. *Dynamic Modeling, Predictive Control and Performance Monitoring: A Data-driven Subspace Approach, Lecture Notes in Control and Information Sciences*. Springer, 2008, 241 p.
14. Pham D., Liu X. *Neural Networks for Identification, Prediction and Control*. Springer, 1995, 238 p.
15. Marquardt D. *SIAM J. Appl. Math.* 1963, no. 11, pp. 164–168.
16. Levenberg K. A *Quart. Appl. Math.* 1944, no. 2, pp. 164–168.
17. Broyden C. G. *Journal of the American Mathematical Community*. 1967, vol. 21, pp. 368–381.

**Прокопьев Игорь Витальевич**

доктор технических наук,  
ведущий научный сотрудник,  
Федеральный исследовательский центр  
«Информатика и управление»  
Российской академии наук,  
(Вычислительный центр  
им. А. А. Дородницына РАН)  
(Россия, г. Москва, ул. Вавилова, 44, стр. 2)  
E-mail: fvi2014@list.ru

**Софронова Елена Анатольевна**

кандидат технических наук, доцент,  
старший научный сотрудник,  
Федеральный исследовательский центр  
«Информатика и управление»  
Российской академии наук  
(Вычислительный центр  
им. А. А. Дородницына РАН)  
(Россия, г. Москва, ул. Вавилова, 44, стр. 2)  
E-mail: sofronova\_ea@mail.ru

**Prokopyev Igor Vitalevich**

doctor of technical sciences, leading researcher,  
Federal research center  
«Computer science and control» of RAS  
(Dorodnitsyn computer center  
of the Russian Academy of Sciences)  
(bld. 2, 44 Vavilova street, Moscow, Russia)

**Sofronova Elena Anatolievna**

candidate of technical sciences,  
associate professor, senior researcher,  
Federal research center  
«Computer science and control» of RAS  
(Dorodnitsyn computer center  
of the Russian Academy of Sciences)  
(bld. 2, 44 Vavilova street, Moscow, Russia)

---

**Образец цитирования:**

Прокопьев, И. В. Исследование метода идентификации модели и методов управления беспилотным транспортным средством по пространственной траектории / И. В. Прокопьев, Е.А. Софронова // Надежность и качество сложных систем. – 2020. – № 3 (31). – С. 99–111. – DOI 10.21685/2307-4205-2020-3-12.

# БЕЗОПАСНОСТЬ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

## SAFETY IN EMERGENCY SITUATIONS

УДК 004.89, 004.94

DOI 10.21685/2307-4205-2020-3-13

A. V. Masloboev

### A TECHNOLOGY FOR DYNAMIC SYNTHESIS AND CONFIGURATION OF MULTI-AGENT SYSTEMS OF REGIONAL SECURITY NETWORK-CENTRIC CONTROL

А. В. Маслобоев

### ТЕХНОЛОГИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА И КОНФИГУРИРОВАНИЯ МУЛЬТИАГЕНТНЫХ СИСТЕМ СЕТЕЦЕНТРИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ РЕГИОНАЛЬНОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ

**Abstract. Background.** The research objective is development of models and technologies for dynamic synthesis and configuration of the distributed multi-level systems of regional security network-centric control. It is essential to property improving of information and analytical support of management activity in situational centers of the region and interaction efficiency enhancement between security operators control under critical situations. *Materials and methods.* The multi-agent system technology serves as the basis for network-centric control implementation tool. The research methodology is based on application of the modified self-organization model of agent coalitions in the peer-to-peer distributed systems on the basis of gradient computational fields. That provides flexible synthesis of the scalable network-centric operating workspaces for virtual control centers of regional security and its system integration within the regional information environment. *Results and conclusions.* Models and technology for dynamic synthesis and configuration of multi-agent decision support systems and associated resource virtual networks for each control field of regional security have been developed. Technology implementation in practice allows formation of network-centric digital platform for security control of the region and potential feature spectrum extension of the existing system of distributed situational centers.

**Аннотация. Актуальность и цели.** Целью исследования является разработка моделей и технологий динамического синтеза и конфигурирования распределенных многоуровневых систем сетецентрического управления региональной безопасностью для повышения качества информационно-аналитического обеспечения управленческой деятельности в ситуационных центрах региона и эффективности взаимодействия органов управления безопасностью в условиях кризисных ситуаций. *Материалы и методы.* Технология мультиагентных систем служит средством реализации сетецентрического управления. Методология базируется на применении модифицированной модели самоорганизации коалиций агентов в одноранговых распределенных системах на основе градиентных вычислительных полей, что обеспечивает гибкий синтез расширяемой сетецентрической среды функционирования виртуальных центров управления безопасностью региона и их системную интеграцию в региональное информационное пространство. *Результаты и выводы.* Разработаны модели и технология динамического синтеза и конфигурирования мультиагентных систем поддержки принятия решений и виртуальных сетей ассоциированных ресурсов для каждой области управления региональной безопасностью. Практическая реализация технологии позволит сформировать сетецентрическую цифровую платформу управления безопасностью региона и рас-

**Keywords:** dynamic synthesis, configuration, multi-agent system, model, self-organization, information technology, network-centric control, security, region.

ширить спектр возможностей существующей системы распределенных ситуационных центров.

**Ключевые слова:** динамический синтез, конфигурирование, мультиагентная система, модель, самоорганизация, технология, сетцентрическое управление, безопасность, регион.

## Introduction

The analysis of the state-of-the-art research in the field of applied multi-agent system (MAS) engineering [1] shows that, despite the great potential of the modern MAS development and based on its technological solutions for various application domains, the issues of applying agent-based technologies for network-centric management information support problem-solving of regional security [2] are not sufficiently studied in theory and practice.

The use of MAS technology in the field of regional security information support is conditioned by the high dynamics of the security management entities functioning environment, the needs to coordinate decentralized decision-making and take into account the human factor within the management process. The latter is expressed in the active influence of the managed system on the control process.

Application of peer-to-peer multi-agent information systems designed on the basis of SOA-technology (SOA – Service-Oriented Architecture) [3] maintaining cloud and web-services allows an adequate information and analytical environment development for regional security management support and decision-making problem-solving taking into account the distribution, dynamics and structural complexity of the regional socio-economic system components. A foundation of the well-known service-oriented approach is the agent-based orientation principle, which consists in use of intelligent agents and web-services as components of distributed information systems that are autonomously functioning and having purposeful behavior. This approach enables the management processes virtualization of regional security individual components by delegating the functions of information monitoring over the state of various regional security indicators and risk management to intelligent pro-active agents.

The application field expansion of MAS technology to regional security management problem-solving provided the prerequisites for a new class of MAS development, namely situational-coalition multi-agent systems (SCMAS). These SCMAS are focused on decision-making information support in the field of security management of socio-economic systems. The SCMAS represents a set of interacting agent coalitions and associated virtual resource networks dynamically formed to provide situational awareness and risk management in diverse crisis situations. The situation refers to a state of the investigated system, characterized by a set of parameters, at a certain time point. In general case, SCMAS form problem-oriented virtual spaces including a set of agents, which possess necessary competencies to solve situation management problems, and a set of information resources and services.

## Problem Statement and Methodology

Agent coalition formation is one of the effective approaches to multi-agent models synthesis and configuration of regional security management organizational structures in heterogeneous crisis situations taking into account dynamically changing conditions. Intelligent agent coalition interaction ensures self-organization and operability of the virtual environment for regional security management, as well as group decision-making coordination. Agent-based monitoring and control are appealed to increase the effectiveness of regional security management information support.

To jointly solve problems in the context of the crisis situation agents can join in coalitions. A coalition of agents is defined as a group of agents united by common goals to solve a problem and having sufficient overall competence to solve this problem. The group goal of agent coalition is defined as an objective function from the individual goals of the agents included in this coalition. The membership of a new agent into the coalition is only possible when it maximizes the objective function describing the group goal of the coalition. There are two ways to form problem-oriented agent coalitions: static and dynamic. In the first case parameters describing the crisis situation and agent competencies are fixed, in the second – they change over the time. In our study we analyze the dynamic formation of agent coalitions.

SCMAS forming problem statement constitutes following main components: set of situations, set of agent coalitions, set of resources and its configuration in the regional virtual environment, which determines possible directions of using the SCMAS in a particular security area.

The SCMAS formal theoretical-multiple model has the following form:

$$SCMAS = \{A, R, VE, ORG, CS, CSC\},$$

where  $A$  is a set of agents from which coalitions are formed  $COAL|_{CS} \subseteq A$  to solve problems defined within the current situation model;  $R$  is a set of resources;  $VE$  is a virtual environment in which the SCMAS is located;  $ORG$  is a set of basic organizational structures that correspond to the agent specific functions (roles) and relationship between the agents;  $CS$  is a set of crisis situations;  $CSC$  is a set of crisis situation classes for which the SCMAS are intended.

For SCMAS dynamic formation special models of agent self-organization are required. As such a model, the MAS self-organization model based on gradient (computational) fields [4] is implemented. In peer-to-peer distributed MAS with this self-organization model an analogue of the field and its gradient is certain distributed data structure with a unique identifier. In the agent environment this data structure is represented in a unified form that allows other agents to access it at each point of virtual environment. The field contains contextual (local or global) information about the environment and/or the gradient field initiator needed for decision-making, coordination and self-organization.

The field propagation function is assigned to system agents. In this case agents relay the field to neighbors, modifying its strength. This process of transferring a field from agent to agent is repeated until the force of the field is less than a certain threshold when it is assumed to be zero. Agents can initiate not one, but several different computational fields (including their combination) depending on their role in the system and resource capabilities.

With this approach the agent self-organization consists in automatic formation of problem-oriented multi-agent virtual spaces [5], combining agents with close goals and the required set of competencies in coalitions, within the distributed information environment. At the same time control agent-moderators are generated for each separated virtual space, implementing procedures for task distribution between the agents, inter-coalition migration and reorganization processes coordination, identifying certificates issue, etc.

The formal model of agent computational field is as follows:

$$ACF = \langle ID, LC, PR, t \rangle,$$

where  $ACF$  is a agent computational field;  $ID$  is a unique identifier of data structure (computational field);  $LC$  is a contextual information about the field initiating agent (local context of the agent, including description of its competencies, model of the current situation and tasks to be solved, location in the network, etc.);  $PR$  is a rule of field propagation over the network;  $t$  is the agent lifetime in the network or the time when its local context is updated.

By context is meant according to [6] a model describing the knowledge relevant to user task and shared by the information environment components in the course of solving the task. In other words the context is any information that can be used to characterize the situation in which a certain object is currently located and information that can be obtained from that object. The object may be an agent, a user, an external environment, a physical object or an application program. The situation occurs when objects interact. As a result, the context forms a part of the information environment used by the objects in their interaction [7].

Agents have access to the field by perceiving the values of its parameters and changing it to reflect the local context representing the location and/or state of the agent. An agent located at a specific point in the virtual space perceives parts of the gradient field from its neighbors and selects a behavior strategy (deterministic or probabilistic) controlled by the resulting field. It interacts with neighbors in some form, for example, it moves to them, sends messages through them, inquires them for information, etc. The source of coordinating information during this selection remains the gradient field and its local characteristics, which are perceived by each agent.

The necessary and sufficient condition for SCMAS formation in the virtual environment is the gradient collinearity and co-directionality of computational fields of the given set of agents and certain source initiator. Formally, this rule is described as follows:

$$\nabla ACF|_{a_k} \uparrow \uparrow \nabla ACF|_{a_i},$$

where  $\nabla ACF|_{a_k}$  is a gradient of agent computational field  $a_k \in A$  that initiated the field;  $\nabla ACF|_{a_i}$  is a gradient of other agent computational field  $a_i \in A, i = \overline{1...N}$  in the virtual environment. At the same time initi-

ating agent  $a_k \in A$  "attracts" agents  $a_i \in A, i = \overline{1...N}$  to itself and is the managing agent-moderator within the framework of problem-oriented virtual space formed around it.

The agent "movement" coordination in the virtual space (MAS dynamics) is carried out by the shape of the field and its change from node to node, from agent to agent. Information about the agent "movement" direction is obtained by evaluating the changes of computational field and agent local context represented in it in various directions.

### Technology Implementation Procedures

To dynamic configuration problem-solving of the multi-agent system for regional security control (MAS RSC) by forming agent coalitions and associated virtual networks of resources and web-services at different levels of management in each area of regional security, an agent-based technology for dynamic synthesis and configuration of problem-oriented SCMAS has been developed. The technology structure and functional components are represented at figure 1.

The technology implements the following procedures:

- 1) synthesis of virtual organizational management structures (VOMS) models using automated method [8] for different types of situations, determination of its structure and composition;
- 2) potential VOMS participants selection at the strategic and tactical planning levels based on analysis of the security management entities competencies and profiles registered in MAS RSC;
- 3) agent coalitions formation such that its total competencies meet the requirements of solved tasks of the regional security management in crisis situations of a certain security class;
- 4) virtual networks of resources formation associated with security management problems for various situations and with synthesized agent coalitions that form the VOMS;
- 5) search and composition of web-services for processing and analysis of data sets generated during execution of the fourth procedure for each area of regional security and multiple tasks to be solved;
- 6) quality analysis of the generated VOMS configuration and efficiency assessment of its implementation;
- 7) parameters additional determination of the agent local context or MAS RSC information objects based on the results of the sixth procedure, if necessary, and further reconfiguration of the generated VOMS;
- 8) formation of problem-oriented multi-agent virtual spaces, which are SCMAS, based on synthesized VOMS for each regional security area;
- 9) reorganization and reconfiguration of MAS RSC in case of obtaining new information from the external environment, connection (deactivation) of MAS RSC components (agents, web-services, data sources), registration of new security management actors in the system, integration of third-party information systems elements, etc.

The SCMAS formation is one of the effective methods for implementing the synthesis of network-centric management systems of regional security.

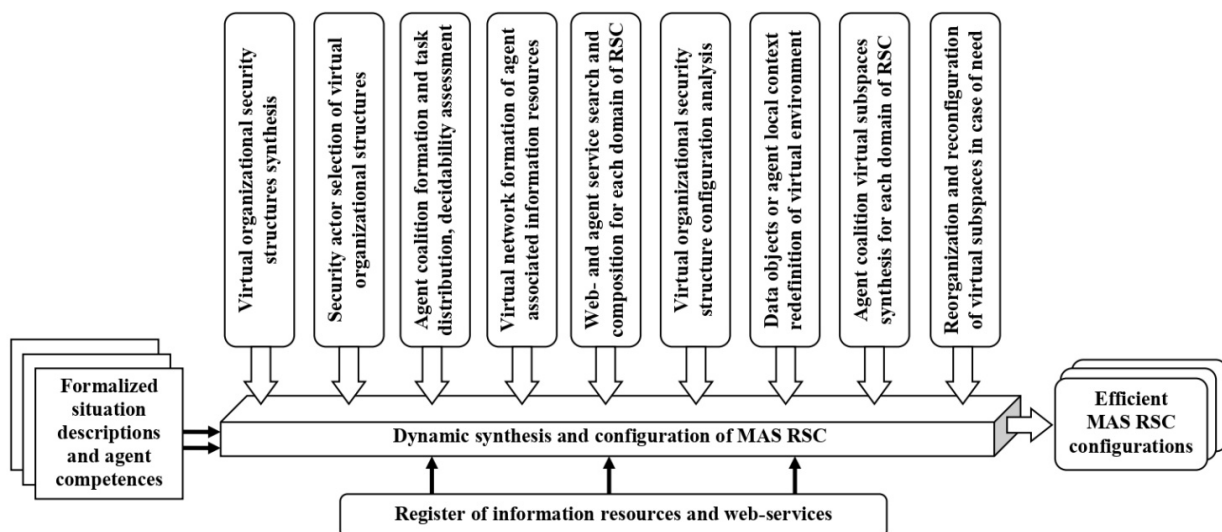


Fig. 1. Structural model of technology for dynamic synthesis and configuration of multi-agent system of regional security control (MAS RSC)

Various SCMAS configurations are designed and tested on the basis of the JADE-platform (Java Agent Development Environment) [9] and using the Netlogo software agent simulator [10].

The configuration of the MAS RSC directly depends on the configuration parameters of the generated problem-oriented multi-agent virtual spaces for each regional security area. That is, the MAS RSC configuration model as a part of unified information environment of the region is described by a set of configuration models:

$$VE_{MAS\ RSC} = \{VE_i |_{CSC_i}\}, i = \overline{1..M}, VE_{MAS\ RSC} \subset VE_{region},$$

where  $VE_{region}$  is a configuration model of regional information environment;  $VE_i |_{CSC_i}$  is a configuration model of problem-oriented multi-agent virtual space, formed for management information support problem-solving under crisis situations of the  $i$  security class;  $M$  is a number of problem-oriented multi-agent virtual spaces forming the MAS RSC, and at the same time  $M$  can be fixed both in the case of using the generally accepted tree-like crisis classifier for various types of security, and dynamically change taking into account the self-organization of MAS RSC elements, new nodes connection, agent generation, crisis situations registration or new information receipt in the system.

Formally, the configuration model of a problem-oriented multi-agent virtual space is described by a tuple of sets:

$$VE_i |_{CSC_i} = \{SS^i, R^i, AS^i, WS^i, Z^i |_{CSC_i}\},$$

where  $SS^i$  is a set of VOSM forming the  $i$  virtual space,  $SS^i = \left\{ coal_{F^j, I^k_{z_q}} \subseteq A \right\}$ ,  $coal_{F^j, I^k_{z_q}} \subseteq A$  is a set of agent coalitions participating in problem-solving  $z_q \in Z^i |_{CSC_i}$  with functional ( $F$ ) and informational ( $I$ ) competencies  $(F^j, I^k_{z_q})$ ;  $R^i$  is a set of information and analytical resources integrated within the  $i$  virtual space;  $AS^i$  is a set of services;  $WS^i$  is a set of web-services registered in MAS RSC used in  $i$  virtual space;  $Z^i |_{CSC_i}$  is a set of tasks to be solved within the framework of crisis situations of the  $i$  security class;  $CSC_i$  is a  $i$  security class according to the tree-like classifier of crisis situations.

The structural model of MAS RSC configuration process is shown schematically in figure 2.

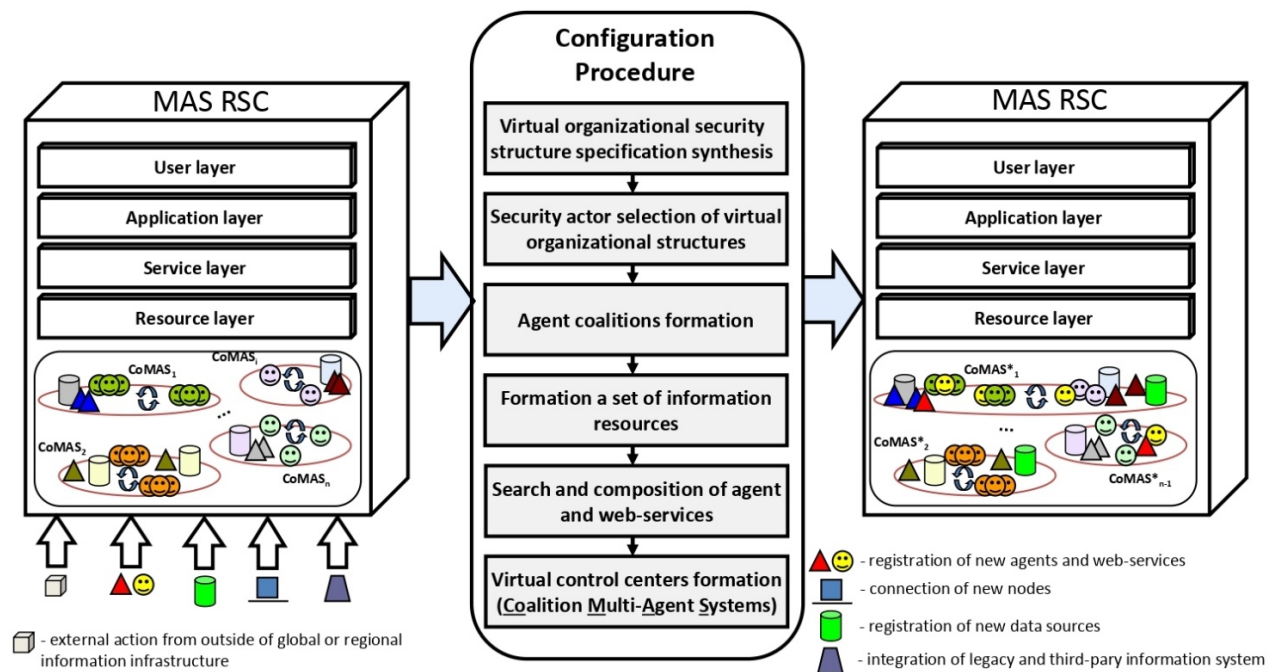


Fig. 2. Conceptual scheme of configuration procedure of virtual environment for regional security control based on coalition multi-agent systems (CoMAS)

## Discussion

Dynamic configuration and self-organization of MAS RSC components are a necessary and sufficient condition to maintain its operability and self-development in the regional information environment. The application effect of MAS RSC is higher than larger and more meaningful its internal volume is, i.e. number of registered heterogeneous security management entities and their virtual representatives (agents), web-services, connected nodes, information resources, integrated software components of departmental information systems, etc. However, the growth of system volume naturally leads to an increase of the problem complexity of information elements and services retrieval and VOMS variants composition because of polynomial growth of the number of alternatives. In order to the system is not losing its availability under conditions of its own unrestricted growth, special self-organization mechanisms allowing its internal structure dynamic formation are needed. Such mechanisms implementation provides volume reduction of processed and transmitted data during the new information resources and web-services registration in the system as well as during the search for joint activity agents on the distributed system nodes and its competencies assessment followed by agent coalition formation and effective VOMS models synthesis.

To solve this problem we propose a mechanism for agent self-organization, improving the implementation effect of self-organization model based on gradient (computational) fields. Our self-organization mechanism is based on generalization procedures of the formalized descriptions of crisis situations and solving managerial tasks using tree-like conceptual models of the knowledge domains. Formal generalization procedures in detail are proposed in [11]. The search criteria for web- and agent services and information resources retrieval in the semantic space (knowledge domain ontology) used during VOMS synthesis are weakened under generalization process. A semantic space is represented by the conceptual model of regional security [12]. This also uses a tree-based crisis situation classifier for different security areas. The generalization procedure provides semantics automated synthesis of the group of solving control problems within the framework of a generalized crisis situation and, through this, a potential increase of the number of alternative VOMS variants generated within the virtual environment. Technically, the semantic description generalization of several security management tasks or crisis situations consists in creating a new task or situation that "covers" the initial ones, and generating of software agent possessing a necessary set of competencies to solve this problem or situation and representing generalized competencies of the agent coalition.

With this approach the preliminary formation of problem-oriented multi-agent virtual spaces is carried out by mapping the agent goals and competencies to tree-based conceptual models of the knowledge domain followed by subsequent localization of the main part of agent retrieval and other requests within the group and further activity analysis of its communications with each other. The similarity of interests (including solving tasks, required set of competencies or services, etc.) leads to the fact that the most active and information-rich agent communications are concentrated inside a single virtual space, while outside it information exchange is less active. The approach is based on multi-agent technology for virtual integration platforms formation proposed in the study [5]. This technology provides the possibility to reduce network traffic and load on system nodes by reducing the number of communications between system agents and reducing the volume of data processed and transmitted by agents in a distributed information environment.

To solve the dynamic configuration problem of problem-oriented virtual spaces and MAS RSC in general special agent learning methods are required. For this purpose an approach to agent learning based on the combined use of agent simulation apparatus and polymodel complexes that are part of the MAS RSC distributed agent platform [13], as well as a model generally accepted in the collective intelligence theory based on collective (group) learning with reinforcement [14, 15], which is a special case of the learning by instruction method is proposed. At the same time the instructor role appears both the environment itself and its model embedded in the agent simulation apparatus and developed by it. As one of varieties of collective learning models with reinforcement we propose to use the modified Q-learning method [15] based on the Q-routing and optimization algorithms implementation according to the ant colony principle (Swarm Intelligence). This approach provides agent behavior strategy focused selection based on the previous interactions experience with the environment and with other agents. The Q-learning method limitation [16] is its applicability only to situations that can be represented in the form of Markov decision process.

The contribution of the proposed method of agent learning consists in integration of collective learning model with reinforcement (Q-learning) based on ant colony principle (Swarm Intelligence) and external environment system-dynamic model implemented in agent simulation apparatus [17]. This improves the au-

tonomy and efficiency of software agents in solving user problems in conditions of incomplete semi-structured data.

### Conclusion

A multi-agent virtual environment for network-centric control information support of regional security is a distributed system of autonomous software agents, information resources and web-services, as well as special software that supports the joint use of elements of this system in a single information environment. To functioning support of such an environment under conditions of decentralized management and external environment high dynamics, a technology for dynamic synthesis and configuration of virtual resource networks with dedicated organizational management centers of regional security has been developed. The technology is based on agent self-organization models in open multi-agent systems and provides operability enhancement of relevant information collecting and processing to decision-making support at all levels of regional security management.

Distinctive features of the developed technology are:

- behavior modeling of the each subject of management as an autonomous pro-active entity with its own interests and goals;
- implementation and use of cognitive agents with a simulation apparatus having a hybrid architecture;
- implementation of network-centric control principles;
- implementation of modified agent self-organization model based on gradient computational fields;
- agents high adaptation to external environment dynamics due to combined use of collective learning methods with reinforcement (Q-Learning) and system-dynamic models embedded in the agents' simulation apparatus.

Proposed technology implementation in practice ensures the achievement of the following system effects: adaptability, self-organization and self-contextualization abilities, decentralized control coordination, self-identification, infomobility.

Technology application limitations may be the reasons associated with the occurrence of abnormal situations within the MAS itself. Examples of such situations are: incomprehensible information receiving from the external environment that is difficult for system agents to perceive and which does not induce the agents to take any actions; the computational field initiated by the agents is not perceived by other agents and its action is useless, which decelerates agent self-organization process into problem-oriented virtual spaces and interrupts the coordination of its behavior.

***Acknowledgements.** The work was carried out within the framework of the State Research Program of the Institute for Informatics and Mathematical Modeling of the Kola Science Centre of RAS (project No. 0226-2019-0035) and was sponsored by the Russian Foundation for Basic Research under grant No. 18-29-03022.*

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИИММ КНЦ РАН (НИР № 0226-2019-0035) и при частичной поддержке РФФИ (проект 18-29-03022-мк).*

### Библиографический список

1. Wooldridge, M. An Introduction to MultiAgent Systems / M. Wooldridge. – Second Edition. – John Wiley & Sons, 2009. – 484 p.
2. Маслобоев, А. В. Информационное измерение региональной безопасности в Арктике / А. В. Маслобоев, В. А. Путилов. – Апатиты : КНЦ РАН, 2016. – 222 с.
3. Dragoni, N. Microservices: Yesterday, Today, and Tomorrow / N. Dragoni // Present and Ulterior Software Engineering / ed. by M. Mazzara, B. Meyer. – Springer Publ., Cham, 2017. – P. 195–216.
4. Mamei, M. Co-Fields: A Physically Inspired Approach to Motion Coordination / M. Mamei, F. Zambonelli, L. Leonardi // IEEE International Journal of Pervasive Computing. – 2004. – Vol. 3, № 2. – P. 52–61.
5. Маслобоев, А. В. Мультиагентная технология формирования виртуальных бизнес-площадок в едином информационно-коммуникационном пространстве развития инноваций / А. В. Маслобоев // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2009. – № 6 (64). – С. 83–89.
6. Разработка многоагентной технологии управления контекстом в открытой информационной среде / А. В. Смирнов, Т. В. Левашова, Н. Г. Шилов, М. П. Пашкин [и др.] // Труды СПИИРАН. – 2006. – Вып. 3. – Т. 1. – С. 33–61.

7. Контекстно-управляемая поддержка принятия решений в распределенной информационной среде / А. В. Смирнов, М. П. Пашкин, Н. Г. Шилов, Т. В. Левашова, А. М. Кашевник // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2009. – № 1. – С. 38–48.
8. Маслобоев, А. В. Метод автоматизированного синтеза виртуальных организационных структур для задач управления региональной безопасностью / А. В. Маслобоев // Программные продукты и системы. – 2013. – № 4 (104). – С. 141–149.
9. Sallam, A. Integration of Web Services and Agent technologies: Web Services supervision system based on JADE / A. Sallam. – LAP Lambert Academic Publishing, 2011. – 96 p.
10. Wilensky, U. An introduction to agent-based modeling: Modeling natural, social and engineered complex systems with NetLogo / U. Wilensky, W. Rand. – Cambridge, MA : MIT Press, 2015. – 504 p.
11. Шишаев, М. Г. Метод генерализации бизнес-предложений в системе информационной поддержки инноваций / М. Г. Шишаев, А. В. Маслобоев // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2010. – № 2. – С. 28–41.
12. Маслобоев, А. В. Концептуальная модель интегрированной информационной среды поддержки управления безопасностью развития региона / А. В. Маслобоев, В. А. Путилов // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. – 2011. – Т. 14, № 4. – С. 842–853.
13. Маслобоев, А. В. Проблемно-ориентированная агентная платформа для создания полимодельных комплексов поддержки управления безопасностью региона / А. В. Маслобоев, А. В. Горохов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2012. – № 2 (78). – С. 60–65.
14. Шереметов, Л. Б. Децентрализованное управление адаптивными сетями поставок на основе теории коллективного интеллекта и агентной технологии. Часть 1: Модель сети поставок / Л. Б. Шереметов // Информационно-управляющие системы. – 2009. – № 4. – С. 13–20.
15. Wolpert, D. An introduction to collective intelligence. Technical Report NASA-ARCIC-99-63 / D. Wolpert, T. Kagan. – NASA, Ames Research Center, 1999. – 88 p.
16. Watkins, C. Learning from Delayed Rewards. PhD Dissertation / C. Watkins. – Cambridge University, 1989. – 234 p.
17. Маслобоев, А. В. Гибридная архитектура интеллектуального агента с имитационным аппаратом / А. В. Маслобоев // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. – 2009. – Т. 12, № 1. – С. 113–124.

### References

1. Wooldridge M. *An Introduction to MultiAgent Systems*. Second Edition. John Wiley & Sons, 2009, 484 p.
2. Masloboev A. V., Putilov V. A. *Informatsionnoe izmerenie regional'noy bezopasnosti v Arktike* [Information dimension of regional security in the Arctic]. Apatity: KNTs RAN, 2016, 222 p. [In Russian]
3. Dragoni N. *Present and Ulterior Software Engineering*. Springer Publ., Cham, 2017, pp. 195–216.
4. Mamei M., Zambonelli F., Leonardi L. *IEEE International Journal of Pervasive Computing*. 2004, vol. 3, no. 2, pp. 52–61.
5. Masloboev A. V. *Nauchno-tehnicheskij vestnik SPbGU ITMO* [Scientific and technical Bulletin of St. Petersburg state University ITMO]. 2009, no. 6 (64), pp. 83–89. [In Russian]
6. Smirnov A. V., Levashova T. V., Shilov N. G., Pashkin M. P. et al. *Trudy SPIIRAN* [Works of SPIIRAN]. 2006, iss. 3, vol. 1, pp. 33–61. [In Russian]
7. Smirnov A. V., Pashkin M. P., Shilov N. G., Levashova T. V., Kashevnik A. M. *Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy* [Information technology and computing systems]. 2009, no. 1, pp. 38–48. [In Russian]
8. Masloboev A. V. *Programmnye produkty i sistemy* [Software products and systems]. 2013, no. 4 (104), pp. 141–149. [In Russian]
9. Sallam A. *Integration of Web Services and Agent technologies: Web Services supervision system based on JADE*. LAP Lambert Academic Publishing, 2011, 96 p.
10. Wilensky U., Rand W. *An introduction to agent-based modeling: Modeling natural, social and engineered complex systems with NetLogo*. Cambridge, MA: MIT Press, 2015, 504 p.
11. Shishaev M. G., Masloboev A. V. *Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy* [Information technology and computing systems]. 2010, no. 2, pp. 28–41. [In Russian]
12. Masloboev A. V., Putilov V. A. *Vestnik MGTU. Trudy Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [MSTU Bulletin. Proceedings of the Murmansk state technical University]. 2011, vol. 14, no. 4, pp. 842–853. [In Russian]
13. Masloboev A. V., Gorokhov A. V. *Nauchno-tehnicheskij vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki* [Scientific and technical Bulletin of information technologies, mechanics and optics]. 2012, no. 2 (78), pp. 60–65. [In Russian]
14. Sheremetov L. B. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy* [Information and control systems]. 2009, no. 4, pp. 13–20. [In Russian]

15. Wolpert D., Kagan T. *An introduction to collective intelligence. Technical Report NASA-ARCIC-99-63*. NASA, Ames Research Center, 1999, 88 p.
16. Watkins C. *Learning from Delayed Rewards. PhD Dissertation*. Cambridge University, 1989, 234 p.
17. Masloboev A. V. *Vestnik MGTU. Trudy Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [MSTU Bulletin. Proceedings of the Murmansk state technical University]. 2009, vol. 12, no. 1, pp. 113–124. [In Russian]

---

**Маслобоев Андрей Владимирович**

доктор технических наук, доцент,  
ведущий научный сотрудник,  
Институт информатики и математического  
моделирования технологических процессов  
Кольского научного центра РАН  
(Россия, Мурманская область, г. Апатиты,  
ул. Ферсмана, 14)  
E-mail: masloboev@iimm.ru

**Masloboev Andrey Vladimirovich**

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

---

**Образец цитирования:**

Masloboev, A. V. A technology for dynamic synthesis and configuration of multi-agent systems of regional security network-centric control / A. V. Masloboev // Надежность и качество сложных систем. – 2020. – № 3 (31). – С. 112–120. – DOI 10.21685/2307-4205-2020-3-13.

И. А. Кубасов

## МЕТОДИКА КАТЕГОРИРОВАНИЯ ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНЫХ ОБЪЕКТОВ ПО СТЕПЕНИ ЗАЩИЩЕННОСТИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЛОГАРИФМИЧЕСКОЙ ШКАЛЫ

I. A. Kubasov

### METHODOLOGY FOR CATEGORIZING POTENTIALLY HAZARDOUS OBJECTS BY DEGREE OF PROTECTION USING LOGARITHMIC SCALE

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Потребность категорирования потенциально опасных объектов обусловлена необходимостью обеспечения единства подходов к управлению безопасностью объектов, включая вопросы создания и совершенствования систем обеспечения безопасности, проведения соответствующих мероприятий по защите и оценке их эффективности. Разработанная методика категорирования потенциально опасных объектов по степени защищенности представляет собой востребованный практикой математический инструмент, обеспечивающий эффективное управление безопасностью объектов. *Материалы и методы.* Описана процедура категорирования потенциально опасных объектов, предполагающая нахождение информативного множества признаков классификации и обоснование или выбор критериальных значений, позволяющих объединять потенциально опасные объекты в категории (классы). Условные границы категорий объектов определяются по значениям показателей категорирования, которые количественно (или качественно) описывают существенные для решаемой задачи стороны объекта. *Результаты.* Предложен новый способ категорирования потенциально опасных объектов по степени защищенности с применением логарифмической шкалы. Такой способ позволяет получить оценку категории объекта в виде числа из натурального ряда чисел, расположенных в диапазоне от 1 до 6, что удобно при рассмотрении экономической стороны вопроса и при разработке математических методов поддержки принимаемых решений. Приведен пример категорирования объекта по степени защищенности с применением логарифмической шкалы. *Выводы.* Предлагаемая методика является основой обоснования необходимого и достаточного уровней безопасности потенциально опасных объектов определенной категории с учетом риска аварии в результате воздействия антропогенных, техногенных и природных факторов, а также с учетом экономии и рационального использования ресурсов, требуемых для обеспечения эффективного управления безопасностью объектов различных категорий.

**Annotation.** *Background.* The need to categorize potentially dangerous objects is due to the need to ensure unity of approaches to managing the safety of objects, including the creation and improvement of security systems, conducting appropriate protection measures and evaluating their effectiveness. The developed method of categorizing potentially dangerous objects by the degree of security is a mathematical tool in demand in practice, which provides effective management of object security. *Materials and methods.* The procedure for categorizing potentially dangerous objects is described, which involves finding an informative set of classification features and justifying or selecting criteria values that allow combining potentially dangerous objects into categories (classes). Conditional borders of object categories are determined by the values of categorization indicators that quantitatively (or qualitatively) describe the essential aspects of the object for the task being solved. *Results.* A new method of categorizing potentially dangerous objects by the degree of security using a logarithmic scale is proposed. This method allows you to get an estimate of the object category as a number from a natural series of numbers located in the range from 1 to 6, which is convenient when considering the economic side of the issue and when developing mathematical methods to support decisions. An example of categorizing an object by security level using a logarithmic scale is given. *Conclusions.* The proposed method is the basis for justifying the necessary and sufficient levels of safety of potentially dangerous objects of a certain category, taking into account the risk of an accident as a result of anthropogenic, man-made and natural factors, as well as taking into account the economy and rational use of resources required to ensure effective safety management of objects of various categories.

**Ключевые слова:** потенциально опасный объект; категорирование; степень защищенности; управление безопасностью; логарифмическая шкала.

**Keywords:** potentially dangerous object; categorization; security degree; management of safety; logarithmic scale.

### Введение

Вопросам обеспечения безопасности потенциально опасных объектов всегда должно уделяться повышенное внимание, что обусловлено многими причинами, в том числе и попытками совершения террористических актов на таких объектах, являющихся объектами первоочередной защиты [1–6]. При этом чрезвычайно важным является корректное проведение категорирования по степени защищенности таких объектов.

Категорирование объектов необходимо для:

- формирования требований к уровню защищенности объектов, составу систем обеспечения безопасности объектов при строительстве, расширении, реконструкции и техническом перевооружении;
- обоснования технических решений по созданию (совершенствованию) систем обеспечения безопасности объектов;
- разработки мероприятий по обеспечению готовности объектов к локализации и ликвидации опасных повреждений и аварийных ситуаций.

Поэтому весьма актуальным является выработка единого методологического подхода к категорированию потенциально опасных объектов и, в частности, к организации их защиты.

В статье предлагается методика как еще один способ категорирования потенциально опасных объектов по степени защищенности, отличающийся от иных известных способов [2, 7, 8] тем, что нормативные значения показателей степени защищенности задаются на основе применения логарифмической шкалы.

### Принципы и правила классификации объектов, подлежащих категорированию

Потенциально опасный объект – это объект, на котором расположены здания и сооружения повышенного уровня ответственности, либо объект, на котором возможно одновременное пребывание более пяти тысяч человек [9]. Также имеется иное определение потенциально опасного объекта: объект, на котором используют, производят, перерабатывают, хранят или транспортируют радиоактивные, пожаровзрывоопасные, опасные химические и биологические вещества, создающие реальную угрозу возникновения источника чрезвычайной ситуации (ГОСТ Р 22.0.02–94. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Термины и определения основных понятий).

Процедура построения классификации объектов – это логическая операция, состоящая в приведении совокупности объектов в систему, в установлении отношений родства между этими объектами, в группировании их в классификационные ячейки – таксоны по степени родства. Данная процедура предполагает нахождение информативного множества признаков классификации и обоснование или выбор критериальных значений, позволяющих объединять объекты в категории (классы).

При классификации потенциально опасных объектов, подлежащих категорированию, должны учитываться следующие факторы:

- степень реальной угрозы возникновения источника чрезвычайной ситуации (ЧС) в результате воздействия антропогенных, техногенных и природных факторов на объект;
- уязвимость производственно-технологического процесса функционирования объекта, которая характеризуется наличием критических элементов, возможностью совершения на них террористических акций, хищения имеющихся на объекте опасных веществ и материалов в целях создания ЧС;
- степень предотвращения или предельного снижения негативных последствий возникновения потенциальных опасностей в чрезвычайных ситуациях для населения, других объектов и окружающей природной среды.

Основными принципами классификации потенциально опасных объектов, подлежащих категорированию по степени защищенности, являются:

- учет государственной, социальной и экономической значимости объектов;
- учет тяжести последствий ЧС на объектах для населения, территории и окружающей природной среды.

Отнесение объекта к категории опасного производственного объекта осуществляется в процессе его идентификации на основании установления признаков, указанных в Федеральном законе «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» [9].

В целом методология категорирования объектов базируется на указанных принципах и правилах классификации объектов. Правила классификации объектов, подлежащих категорированию, предполагают выполнение двух этапов: процедуру построения классификации и процедуру ее использования.

Построение классификации основано на выборе количества категорий, показателей и критериев категорирования. Процедура использования классификации объектов, подлежащих категорированию, предполагает выполнение определенных этапов (рассмотрим далее на примере).

В соответствии с Постановлением Правительства РФ № 1094 от 13.09.1996 [10] установлено шесть категорий объектов по степени потенциальной опасности. Поэтому с учетом взаимосвязи категорий по степени потенциальной опасности и степени защищенности предлагается также выбрать шесть категорий объектов по степени защищенности. При этом объекты 1 и 2 категорий – это объекты высокой защищенности, 3 и 4 категории – объекты средней защищенности, 5 и 6 – объекты низкой защищенности.

### Обоснование применения логарифмической шкалы

Основные показатели и критерии чрезвычайных ситуаций (аварий) можно представить в табл. 1 [10].

Таблица 1

| Показатели социально-экономических последствий                 | Категории опасности |        |        |        |        |        |
|----------------------------------------------------------------|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                                                                | K1                  | K2     | K3     | K4     | K5     | K6     |
| Количество пострадавших людей, более                           | $10^5$              | $10^4$ | $10^3$ | $10^2$ | 10     | 1      |
| Количество людей, у которых нарушены условия жизнедеятельности | $10^7$              | $10^6$ | $10^5$ | $10^4$ | $10^3$ | $10^2$ |
| Величина ущерба, долл., более                                  | $10^9$              | $10^8$ | $10^7$ | $10^6$ | $10^5$ | $10^4$ |
| Размер зоны поражения, км                                      | $10^4$              | $10^3$ | $10^2$ | 10     | 1      | 0,1    |

Как видно из табл. 1, размеры зон поражения ЧС различных категорий отличаются на один или несколько десятичных порядков. То же самое справедливо для различных характеристик ущерба, связанного с ЧС.

Общепринятым математическим способом работы с сильно отличающимися величинами является перевод их в безразмерную форму и логарифмирование. Величинам, отличающимся на несколько десятичных порядков, соответствуют десятичные логарифмы, отличающиеся на несколько единиц.

Для представления категорий таких аварий первыми числами натурального ряда необходимо численное выражение ущерба от них перевести в логарифмическую форму. Так возникает понимание целесообразности и неизбежности логарифмической шкалы для категорирования опасностей, связанных с авариями на объектах.

Применение логарифмической шкалы для категорирования опасностей аварий на объектах путем перевода количественных выражений ущербов, связанных с авариями, в величины натурального ряда чисел, было предложено С. А. Щербаковым [11].

Применяя для категорирования объектов по степени защищенности также логарифмическую шкалу, категорию защищенности объекта можно оценить по формуле

$$U_a = 6 - \lg \frac{t_a}{t_6} - \lg \frac{m_a}{m_6}, \quad (1)$$

где  $t_a$  – реальное время доступа до критической точки провоцирования аварии;  $t_6$  – расчетное время доступа до критической точки провоцирования наименее опасной аварии (шестой категории);  $m_a$  – реальная масса снаряжения нарушителя;  $m_6$  – расчетная масса снаряжения, необходимого для провоцирования наименее опасной аварии (шестой категории).

Если оценка категории защищенности окажется равной 1 или менее, то объекту по отношению к данной аварии (диверсии, теракту, провоцирующему данную аварию) присваивается первая (высшая) категория защищенности.

Следует заметить, что  $t_a$  выступает, как показатель эффективности охраны объекта, а  $m_a$  – показатель собственной (технологической) защищенности объекта.

В интересах повышения защищенности объекта необходимо усилить охрану, снабдить ее дополнительными современными техническими средствами и оружием, а также выполнить специальное инженерно-строительное укрепление объекта и т.д. В результате реализации запланированных мероприятий, что будет связано с определенными капиталовложениями, время доступа для совершения террористической акции будет увеличено до  $t_{ak}$ , а масса снаряжения для провоцирования аварии – до  $m_{ak}$ .

После выполнения указанных мероприятий категория объекта по отношению к данной аварии должна оцениваться по следующей формуле:

$$U_a^* = 6 - \lg \frac{t_a}{t_6} - \lg \frac{m_a}{m_6} - \lg \frac{t_{ak}}{t_a} - \lg \frac{m_{ak}}{m_a}. \quad (2)$$

Таким образом, получены две оценки защищенности по данной аварии: актуальная  $U_a$  (1) и перспективная  $U_a^*$  (2). Какую из этих оценок выбрать для дальнейшей работы – компетенция лица, принимающего решение (ЛПР).

В интересах обеспечения требований к управлению безопасностью целесообразно учитывать обе оценки. Для более эффективного взаимодействия различных служб объекта в формулах (1) и (2) четко разделены слагаемые, содержащие время доступа, за что отвечают спецслужбы, и масса снаряжения террористов, за что отвечают технические службы.

Оценки  $U_a$  (1) и  $U_a^*$  (2) могут незначительно отличаться друг от друга в числовом выражении, но при этом степени защищенности объекта в натуральном выражении могут отличаться во много раз, в чем убеждают данные, приведенные в табл. 2.

Таблица 2

| $U_a - U_a^*$ | Отношение защищенности в натуральном выражении |
|---------------|------------------------------------------------|
| 0,5           | 3 раза                                         |
| 1             | 10 раз                                         |
| 2             | 100 раз                                        |
| 3             | 1000 раз                                       |

В итоге с учетом всего изложенного на основе оценок  $U_a(1)$  и  $U_a^*(2)$  ЛПР принимает окончательную оценку категории защищенности объекта по отношению к конкретной аварии.

### Последовательность определения категории объекта по степени защищенности

Следует заметить, что антропологические (в том числе террористические), техногенные и природные воздействия на объект могут стать причиной возникновения ЧС различных масштабов. При этом террористические воздействия на объект рассматриваются как наиболее опасные, поскольку являются целенаправленными и приводят к более крупным масштабам ЧС. Поэтому категория защищенности объекта определяется, прежде всего, степенью антитеррористической защищенности.

Алгоритм определения категории объекта по степени защищенности включает следующие пункты:

- 1) описание объекта, подлежащего категорированию;
- 2) разработка модели нарушителя;
- 3) анализ системы обеспечения безопасности и выявление уязвимых мест объекта;
- 4) определение уровня эффективности функционирования системы обеспечения безопасности объекта;
- 5) определение категории объекта по степени защищенности.

Численная оценка категории производится по формулам (1) и (2) на основе оценок времени доступа и массы снаряжения нарушителей. Эти оценки в общем случае зависят от сценария терро-

ристических воздействий, поскольку времена доступа и массы снаряжения для разных сценариев могут существенно отличаться. Качественная оценка категории объекта по степени защищенности также зависит от сценария террористических воздействий на объект.

Для каждого сценария террористических воздействий производится сравнение оценок категории защищенности, полученных по формулам (1) и (2). Расхождение этих оценок должно быть не более 1. Если это требование выполняется, то окончательную оценку категории защищенности по данному сценарию делает ЛПР.

Если расхождение оценок более 1, то прежде чем делать окончательную оценку, ЛПР должен потребовать от экспертов уточнения всех величин, фигурирующих в формулах.

Получив оценку категории защищенности объекта по каждому характерному сценарию террористических воздействий, ЛПР сопоставляет ее с опасностью аварии, провоцируемой нарушителями. В качестве категории опасности объекта принимается оценка категории по сценарию, который ЛПР считает наиболее реальным.

### Пример категорирования объекта по степени защищенности

С целью иллюстрации применения методики категорирования объекта по степени его защищенности рассмотрим действия ЛПР при оценке последствий ЧС и принятии решений по снижению категории опасности.

Допустим, что на основе предварительных расчетов получены значения показателей социально-экономических последствий пожара на газовом промысле, возникшего в результате террористической акции (условно, без учета эффективности действий персонала во время и после аварии). Наиболее вероятным сценарием террористического воздействия на защищаемый потенциально опасный объект является следующий: нарушители в составе небольшой группы (3–4 человека) преодолевают забор с колючей проволокой и сигнализацией, пробегают 500 м до главного здания объекта по охраняемой территории и взрывают  $m_a = 100$  кг принесенной с собой взрывчатки. Необходимо вычислить категорию данного объекта по степени его защищенности.

Осуществление описанного сценария возможно только при плохой организации охраны объекта. При эффективной организации охраны нарушители будут задержаны в зоне забора, поскольку для преодоления расстояния от забора до здания с грузом взрывчатки нарушителям понадобится более  $t_a = 100$  с.

Вычислим категорию объекта по степени защищенности по формуле (1):

$$U_a = 6 - \lg \frac{100}{1} - \lg \frac{100}{0,1} = 1.$$

Если категория защищенности объекта ниже категории потенциальной опасности, то необходимо разработать, запланировать и реализовать мероприятия по повышению защищенности объекта по отношению к данной аварии.

Пусть существуют семь сценариев террористических воздействий на объект, в результате которых возможно возникновение семи разных аварий. Категории аварий  $D_a^+$ , время доступа  $t_a$  и масса специального снаряжения  $m_a$  нарушителей, необходимые для провоцирования на объекте указанных аварий, приведены в табл. 3.

Таблица 3

| Показатели     | Номер аварии |     |     |     |     |     |     |
|----------------|--------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                | № 1          | № 2 | № 3 | № 4 | № 5 | № 6 | № 7 |
| $D_a^+$        | 2,0          | 2,5 | 3,0 | 3,5 | 4,0 | 4,5 | 5   |
| $t_a$ , с      | 15           | 15  | 5   | 20  | 5   | 10  | 40  |
| $m_a$ , кг     | 0,2          | 0,1 | 0,7 | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,5 |
| $U_a$ (3.22)   | 4,5          | 4,8 | 4,4 | 4,7 | 5,0 | 4,5 | 3,7 |
| $t_{ak}$ , с   | 180          | 190 | 180 | 180 | 180 | 180 | 180 |
| $m_{ak}$ , кг  | 5            | 5   | 5   | 5   | 5   | 5   | 5   |
| $U_a^*$ (3.23) | 2,0          | 2,3 | 1,9 | 2,2 | 2,5 | 2,0 | 1,2 |
| $U_a^+$        | 2,0          | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 3,0 | 3,0 | 3,0 |

По формуле (1) получаем и помещаем в табл. 3 оценки защищенности объекта  $U_a(I)$  по отношению к каждой аварии. Поскольку аварии расположены в таблице в порядке понижения категории их опасности, то следует обратить внимание прежде всего на колонки, расположенные в левой части таблицы.

Как видно из табл. 3, для аварий от № 1 до № 5 категория по степени потенциальной опасности  $D_a^+$  ниже категории по степени защищенности  $U_a$ , для аварии № 6 – они совпадают, и только для аварии № 7 – выполняется требование по безопасности.

Такая ситуация нетерпима. Необходимо разработать и реализовать мероприятия (по реконструкции, резервированию, рассредоточению и т.п.), обеспечивающие повышение степени защищенности объекта по отношению к этим авариям.

Предположим, что мероприятия осуществлены и получены новые оценки времен доступа  $t_{ak}$  и массы снаряжения  $m_{ak}$  по сценариям трех наиболее опасных аварий. По формуле (2) получены новые оценки защищенности объекта  $U_a^*(2)$ . Указанные величины отражены в табл. 3.

Сопоставляя оценки категорий защищенности объекта по отношению ко всем возможным авариям, ЛПР окончательно устанавливает следующие категории по степени защищенности объекта: вторая категория по отношению к наиболее опасным авариям; третья категория по отношению ко всем остальным авариям.

Таким образом, реальная категория по степени защищенности данного объекта – пятая, а осуществление соответствующих мероприятий позволит перевести объект во вторую категорию и выполнить требование к безопасности объекта.

### Заключение

Категорирование потенциально опасных объектов по степени защищенности исследовано как процедура построения классификации объектов защиты, состоящая в приведении совокупности объектов в систему сгруппированных таксонов по степени их родства, основанной на выборе показателей (время доступа и масса снаряжения) и критериев категорирования (с применением логарифмической шкалы).

Характерной особенностью предлагаемой процедуры категорирования объектов по степени защищенности является применение логарифмической шкалы, позволяющей получить оценку категории объекта в виде числа из натурального ряда чисел, расположенных в диапазоне от 1 до 6. Это удобно при рассмотрении экономической стороны вопроса и при разработке математических методов поддержки принимаемых решений.

Разработанная методика является основой обоснования необходимого и достаточного уровней безопасности потенциально опасных объектов определенной категории, а также определения требуемого состава системы обеспечения безопасности объектов.

### Библиографический список

1. Коршунов, С. С. Совершенствование взаимодействия надзорных органов при осуществлении контрольных мероприятий в отношении субъектов надзора, эксплуатирующих критически важные и потенциально опасные объекты / С. С. Коршунов, В. М. Егоров // Технологии гражданской безопасности. – 2016. – Т. 13, № 2 (48). – С. 16–20.
2. Боровский, А. С. Особенности идентификации предметной области «категорирование потенциально опасных объектов» в нечеткой постановке / А. С. Боровский, А. Д. Тарасов // Информационные системы и технологии. – 2010. – № 3 (59). – С. 63–71.
3. Северцев, Н. А. Анализ опасностей сложных технических систем. / Н. А. Северцев, И. А. Кубасов, О. А. Бобр // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2006. – Т. 2. – С. 170–172.
4. Северцев, Н. А. Исследование рисков в деятельности человека / Н. А. Северцев, И. А. Кубасов, О. А. Бобр // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2006. – Т. 2. – С. 172–175.
5. О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера : федер. закон № 68-ФЗ от 21.12.1994 (ред. от 01.04.2020).
6. Об утверждении требований к антитеррористической защищенности объектов (территорий) системы государственного материального резерва и формы паспорта безопасности этих объектов (территорий) : постановление Правительства РФ № 1053 от 17.10.2016.
7. Зайцев, А. Г. Категорирование объектов / А. Г. Зайцев // Алгоритм безопасности. – 2006. – № 6. – С. 7–9.

8. Дубинин, Е. Ф. О нормировании риска чрезвычайных ситуаций / Е. Ф. Дубинин, В. И. Куксова // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2019. – № 3. – С. 3–9.
9. О промышленной безопасности опасных производственных объектов : федер. закон № 116-ФЗ от 21.07.1997 (с изменениями на 29 июля 2018 года).
10. О классификации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера : постановление Правительства Российской Федерации № 1094 от 13.09.1996.
11. Щербаков, С. А. Некоторые вопросы генерации нефти и экологические проблемы потребления нефтепродуктов / С. А. Щербаков // Вестник Международного института управления. – 2003. – № 3-4. – С. 109–113.

### References

1. Korshunov S. S., Egorov V. M. *Tekhnologii grazhdanskoj bezopasnosti* [Civil security technologies]. 2016, vol. 13, no. 2 (48), pp. 16–20. [In Russian]
2. Borovskiy A. S., Tarasov A. D. *Informatsionnye sistemy i tekhnologii* [Information systems and technologies]. 2010, no. 3 (59), pp. 63–71. [In Russian]
3. Severtsev N. A., Kubasov I. A., Bobr O. A. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2006, vol. 2, pp. 170–172. [In Russian]
4. Severtsev N. A., Kubasov I. A., Bobr O. A. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2006, vol. 2, pp. 172–175. [In Russian]
5. *O zashchite naseleniya i territoriy ot chrezvychaynykh situatsiy prirodnogo i tekhnogennogo kharaktera: feder. zakon № 68-FZ ot 21.12.1994 (red. ot 01.04.2020)* [About protection of the population and territories from emergency situations of natural and technogenic character: Feder. law no. 68-FZ of 21.12.1994 (as amended on 01.04.2020)]. [In Russian]
6. *Ob utverzhdenii trebovaniy k antiterroristicheskoy zashchishchennosti ob"ektov (territoriy) sistemy gosudarstvennogo material'nogo rezerva i formy pasporta bezopasnosti etikh ob"ektov (territoriy): postanovlenie Pravitel'stva RF № 1053 ot 17.10.2016.* [About the approval of requirements to anti-terrorist protection of objects (territories) of the state material reserve system and the form of the security passport of these objects (territories) : government of the Russian Federation no. 1053 of 17.10.2016]. [In Russian]
7. Zaytsev A. G. *Algoritm bezopasnosti* [The security algorithm]. 2006, no. 6, pp. 7–9. [In Russian]
8. Dubinin E. F., Kuksova V. I. *Problemy bezopasnosti i chrezvychaynykh situatsiy* [Security and emergency issues]. 2019, no. 3, pp. 3–9. [In Russian]
9. *O promyshlennoy bezopasnosti opasnykh proizvodstvennykh ob"ektov: feder. zakon № 116-FZ ot 21.07.1997 (s izmeneniyami na 29 iyulya 2018 goda)* [About industrial safety of hazardous production facilities: feder. law no. 116-FZ of 21.07.1997 (as amended on 29 July 2018)]. [In Russian]
10. *O klassifikatsii chrezvychaynykh situatsiy prirodnogo i tekhnogennogo kharaktera: postanovlenie Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii № 1094 ot 13.09.1996* [On classification of natural and man-made emergencies: decree of the Government of the Russian Federation no. 1094 of 13.09.1996]. [In Russian]
11. Shcherbakov S. A. *Vestnik Mezhdunarodnogo instituta upravleniya* [Bulletin of the International Institute of management]. 2003, no. 3-4, pp. 109–113. [In Russian]

#### Кубасов Игорь Анатольевич

доктор технических наук, профессор,  
кафедра информационных технологий,  
Академия управления МВД России  
(Россия, г. Москва,  
ул. Зои и Александра Космодемьянских, 8)  
E-mail: igorak@list.ru

#### Kubasov Igor Anatolyevich

doctor of technical sciences, professor,  
sub-department of information technologies,  
Academy of Management  
of the Ministry of Internal Affairs  
of the Russian Federation  
(8 Zoi & Alexandra Kosmodemyanskikh street,  
Moscow, Russia)

#### Образец цитирования:

Кубасов И. А. Методика категорирования потенциально опасных объектов по степени защищенности с применением логарифмической шкалы / И. А. Кубасов // Надежность и качество сложных систем. – 2020. – № 3 (31). – С. 121–127. – DOI 10.21685/2307-4205-2020-3-14.

И. Е. Старостин

**ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕШЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛЬНО-ПОТОКОВЫМ  
МЕТОДОМ ЗАДАЧ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМ  
ИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ ЭТИХ СИСТЕМ**

I. E. Starostin

**SOFTWARE IMPLEMENTATION OF SOLVING BY POTENTIAL-STREAMING  
METHOD THE PROBLEMS OF CONSTRUCTION OF SYSTEM MODELS  
FROM TEST RESULTS OF THESE SYSTEMS**

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* При проектировании и создании технических объектов, в частности компонентов авиационных систем, встает вопрос о надежности и качестве их эксплуатации. Пути повышения надежности и качества эксплуатации систем являются: диагностика и прогнозирование, а также управление этими объектами. Для решения описанных задач необходима математическая модель исследуемого технического объекта, которая автором получается из анализа физико-химических процессов потенциально-потокным методом и из результатов испытания этих систем. Трудоемкость описанных действий обуславливает необходимость их программной реализации, в общем случае распределенной (если размерность системы большая). Целью настоящей работы является разработка методов программной реализации построения математических моделей технических объектов из потенциально-потокных уравнений процессов в них и результатов испытания этих объектов. *Материалы и методы.* Потенциально-потокный метод был программно реализован автором с использованием модельно-ориентированного проектирования (стандарт modelica). Программно реализуется расчет различных динамик физико-химических процессов при различных параметрах потенциально-потокных уравнений с дальнейшей аппроксимацией на множестве этих возможных динамик формальной модели в их заданном классе. Экспериментальные исследования формальных параметров этих моделей с дальнейшим построением моделей (из формальных моделей) осуществляются статистическими методами. *Результаты.* На основе описанных методов в настоящей работе представляется структура программной реализации методов построения математических моделей систем из анализа физико-химических процессов в них и результатов испытаний этих систем. *Выводы.* Результаты работы позволяют создать программно-аппаратный комплекс, позволяющий из за-

**Abstract.** *Background.* When designing and creating technical facilities, in particular components of aviation systems, the question arises of the reliability and quality of their operation. Ways to improve the reliability and quality of operation of systems are: diagnostics and forecasting, as well as the management of these objects. To solve the described problems, a mathematical model of the studied technical object is required, which the author obtains from the analysis of physical and chemical processes by the potential-streaming method and from the results of testing these systems. The complexity of the described actions necessitates their software implementation, generally distributed (if the dimension of the system is large). The aim of this work is to develop methods for the software implementation of the construction of mathematical models of technical objects from potential-streaming equations of processes in them and the results of testing these objects. *Materials and methods.* The potential-streaming method was implemented by the author using model-oriented design (modelica standard). The software implements the calculation of various dynamics of physicochemical processes at various parameters of potential-streaming equations with further approximation on the set of these possible dynamics of the formal model in their given class. Experimental studies of the formal parameters of these models with the further construction of models (from formal models) are carried out by statistical methods. *Results.* Based on the described methods, the present paper presents the structure of the software implementation of the methods for constructing mathematical models of systems from the analysis of physical and chemical processes in them and the test results of these systems. *Conclusions.* The results of the work make it possible to create a hardware-software complex that allows one to build formal mathematical models from a user-defined structure of physicochemical processes in a technical object, and then build mathematical models of these systems from available experimental data (in particular, collected by this complex). Because in the general

данной пользователем структуры физико-химических процессов в техническом объекте строить формальные математические модели, затем из имеющихся экспериментальных данных (в частности, собранных этим комплексом) строить математические модели этих систем. Так как в общем случае этот комплекс представляет собой горизонтально масштабируемый вычислительный кластер, то это дает возможность строить описанные модели систем произвольной сложности.

**Ключевые слова:** технические объекты, надежность и качество эксплуатации, потенциально-поточный метод, математическое моделирование.

case, this complex is a horizontally scalable computing cluster, this makes it possible to build the described models of systems of arbitrary complexity.

**Keywords:** technical objects, reliability and quality of operation, potential-streaming method, mathematical modeling.

## Введение

В процессе проектирования и эксплуатации технических объектов (ТО) принципиальная роль отводится обеспечению надежности и качеству их эксплуатации [1]. Для обеспечения этих показателей ТО необходимо обеспечить их допустимые (и оптимальные) режимы работы [1]. Этим целям служит диагностика и прогнозирование технического состояния рассматриваемого ТО [2], а также управление этим объектом [3]; в частности, выбор его параметров. Для решения описанных задач [2, 3] необходима математическая модель рассматриваемого ТО [2–5] – связь одних характеристик этого объекта с другими [6, 7].

Как известно, функционирование ТО определяется протеканием физико-химических процессов (ФХП) в этих объектах [1]. Отсюда автором в работах [6–8] было рассмотрено построение математических моделей рассматриваемых ТО из анализа ФХП в них на основе результатов испытаний этих объектов (в общем случае статистики наблюдений данных характеристик ТО [7]) [6–8]. В общем случае для анализа и математического моделирования динамики ФХП автором в рамках современной неравновесной термодинамики [9–12] был разработан потенциально-поточный метод (ППМ) [12–16] – единый подход анализа и моделирования ФХП различной природы [12, 13]. Получим систему уравнений ППМ, мы эту систему численно-аналитическими методами приводим к виду, представляющему собой связь одних технических характеристик ТО с другими (с наблюдаемыми) [6–8, 17]. Получение такой связи заключается в задании различных значений неизвестных параметров, входящих в уравнения ППМ, расчета для этих неизвестных параметров динамик ФХП и соответственно технических характеристик рассматриваемого ТО и затем аппроксимации на этих различных технических характеристиках математической модели (с точностью до параметров (формальных параметров) – формальной модели) рассматриваемого ТО. Затем эти формальные параметры исследуются на основе экспериментальных данных (ЭД). Исследовав экспериментально эти формальные параметры, мы на основе формальной модели ТО получим искомую модель ТО (в общем случае вероятностную [7]) [6–8, 17].

Отсюда, как нетрудно видеть, построение математической модели ТО из анализа ФХП в нем – достаточно трудоемкий процесс. Это приводит к необходимости программной реализации этой методологии. Более того, в общем случае ФХП в этом объекте могут иметь большое число степеней свободы; благодаря чему система уравнений этих процессов не влезет в память. В таком случае, а также в целях ускорения расчета необходимо распараллеливание расчета на нескольких вычислительных машинах – в вычислительном кластере.

Настоящая работа посвящена программной реализации (с учетом распараллеливания) описанной методологии построения математической модели произвольного заданного ТО на основе ЭД из анализа ФХП в нем.

## Потенциально-поточный метод

В соответствие с ППМ динамика ФХП в произвольном ТО определяется факторами, показанными на рис. 1 [12, 13].



Рис. 1. Факторы, определяющие динамику физико-химических процессов

Для получения из этих уравнений в численном виде динамики ФХП необходима информация о свойствах веществ и процессов в этой системе, начальное состояние системы, неизвестные внешние воздействия, получаемые из ЭД [12, 13]. Эти ЭД представляют собой снятые экспериментально наблюдаемые технические характеристики (ТХ) ТО [13]. Однако однозначно эти величины из экспериментальных данных в общем случае определить нельзя [6, 8, 13]; это и приводит к необходимости преобразования (численно-аналитическими методами) уравнений ППМ к такому виду, в котором эти описанные неизвестные величины уходят, а остаются лишь ТХ, в том числе и те, которые мы можем получить из ЭД [6–8, 17].

В работе [13] рассматривались различные виды программной реализации ППМ, в том числе и в виде блок-диаграмм. Как показано в работе [15], такое представление ФХП в виде блочных диаграмм позволяет выполнять декомпозицию этих процессов, что в свою очередь позволяет распараллелить вычисление динамики ФХП на разных машинах [18].

### Распределенное вычисление динамики физико-химических процессов потенциально-потоковым методом

Пусть ППМ была получена система дифференциальных уравнений динамики ФХП в ТО [12–14], представляемая в общем случае в виде Коши:

$$\frac{dx(t)}{dt} = f(x(t), u(t)), \quad x(t_0) = x_0, \quad t \in [t_0; t_0 + T], \quad (1)$$

$$y(t) = g[x(\tau), u(\tau)](t), \quad t \in [t_0; t_0 + T], \quad (2)$$

где  $x(t)$  – координаты состояния [12, 13];  $u(t)$  – внешние воздействия;  $y(t)$  – ТХ системы (и их производные);  $x_0$  – начальное состояние в начальный момент времени  $t_0$ ;  $T$  – время моделирования системы. В общем случае нам систему (1) и (2) необходимо декомпоновывать на части, каждая из которых помещается в памяти компьютера [18], и обрабатывать ее по частям [18]. Используя декомпозицию ФХП на подпроцессы [15], мы систему (1) представим в виде

$$\frac{dx_i(t)}{dt} = \tilde{f}_i(x_i(t), u_i(t), s_i(t)), \quad s_i(t) = h_i(x(t), u(t)), \quad x_i(t_0) = x_{0,i}, \quad i = 1, n, \quad t \in [t_0; t_0 + T], \quad (3)$$

$$y_i(t) = g_i[x_i(\tau), u_i(\tau), s_i(\tau)](t), \quad i = 1, n, \quad x(t) = \{x_i(t)\}_{i=1}^n, \quad t \in [t_0; t_0 + T], \quad (4)$$

где  $n$  – число подгрупп, на которые мы декомпонуем ФХП; величины  $u_i(t)$ ,  $i = 1, n$  входят в число величин  $u(t)$  в любой момент времени  $t$ . Получив представление (3) и (4) системы (1) и (2), мы,

введя промежуточные динамики (ПД) [15], а также разбив  $[t_0; t_0 + T]$  на промежутки  $[t_0; t_0 + T] = \bigcup_{r=0}^{N-1} [t_r; t_{r+1}]$ , где  $t_0 + T = t_N$ , запишем

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{x}_i^{(k+1)}(t)}{dt} &= \tilde{\mathbf{f}}_i(\mathbf{x}_i^{(k+1)}(t), \mathbf{u}_i(t), \mathbf{s}_i^{(k)}(t)), \quad \mathbf{s}_i^{(k)}(t) = \mathbf{h}_i(\mathbf{x}^{(k)}(t), \mathbf{u}(t)), \\ \mathbf{x}_i^{(k+1)}(t_0) &= \mathbf{x}_{0,i}, \quad i = 1, n, \quad t \in [t_r; t_{r+1}], \quad r = 0, N-1, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\mathbf{y}_i^{(k)}(t) = \mathbf{g}_i[\mathbf{x}_i^{(k)}(t), \mathbf{u}_i(t), \mathbf{s}_i^{(k)}(t)], \quad i = 1, n, \quad \mathbf{x}^{(k)}(t) = \{\mathbf{x}_i^{(k)}(t)\}_{i=1}^n, \quad t \in [t_r; t_{r+1}], \quad r = 0, N-1, \quad (6)$$

где  $k$  – номер итерации. Здесь  $\mathbf{s}_i^{(k)}(t)$ ,  $i = 1, n$  – ПД [15]. В силу условий Липшица [19] итерации (5) и (6) равномерно сходятся к решению системы (3) и (4).

С этой целью представим выражения (3) и (5) в интегральном виде [19]:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_i(t) &= \mathbf{x}_i(t_r) + \int_{t_r}^t \tilde{\mathbf{f}}_i(\mathbf{x}_i(t'), \mathbf{u}_i(t'), \mathbf{s}_i(t')) dt', \quad i = 1, n, \quad t \in [t_r; t_{r+1}], \quad r = 0, N-1, \\ \mathbf{x}_i^{(k+1)}(t) &= \mathbf{x}_i^{(k+1)}(t_r) + \int_{t_r}^t \tilde{\mathbf{f}}_i(\mathbf{x}_i^{(k+1)}(t'), \mathbf{u}_i(t'), \mathbf{s}_i^{(k)}(t')) dt', \quad i = 1, n, \quad t \in [t_r; t_{r+1}], \quad r = 0, N-1; \end{aligned}$$

отсюда в силу условий Липшица [19], в силу неравенства треугольника, а также в силу теоремы об интегрировании неравенств имеем (норма вектора-столбца – сумма модулей каждой координаты вектора-столбца)

$$\begin{aligned} \|\mathbf{x}_i^{(k+1)}(t) - \mathbf{x}_i(t)\| &= \|\mathbf{x}_i^{(k+1)}(t_r) - \mathbf{x}_i(t_r)\| + \left\| \int_{t_r}^t (L_x^{\tilde{\mathbf{f}}} \|\mathbf{x}_i^{(k+1)}(t') - \mathbf{x}_i(t')\| + L_s^{\tilde{\mathbf{f}}} \|\mathbf{s}_i^{(k)}(t') - \mathbf{s}_i(t')\|) dt' \right\|, \\ i &= 1, n, \quad t \in [t_r; t_{r+1}], \quad r = 0, N-1; \end{aligned}$$

отсюда в силу леммы Гронуола [19] имеем

$$\begin{aligned} \|\mathbf{x}_i^{(k+1)}(t) - \mathbf{x}_i(t)\| &\leq \left( \|\mathbf{x}_i^{(k+1)}(t_r) - \mathbf{x}_i(t_r)\| + L_s^{\tilde{\mathbf{f}}} \|\mathbf{s}_i^{(k)}(t') - \mathbf{s}_i(t')\| \Delta t_r \right) \exp(L_x^{\tilde{\mathbf{f}}} \Delta t_r), \quad i = 1, n, \\ t &\in [t_r; t_{r+1}], \quad r = 0, N-1, \end{aligned} \quad (7)$$

где

$$\Delta t_r = t_{r+1} - t_r. \quad (8)$$

Согласно (3) и (5) в силу условий Липшица [19] имеем

$$\|\mathbf{s}_i^{(k)}(t) - \mathbf{s}_i(t)\| = L_x^{\mathbf{h}} \|\mathbf{x}^{(k)}(t) - \mathbf{x}(t)\|, \quad i = 1, n, \quad t \in [t_r; t_{r+1}], \quad r = 0, N-1; \quad (9)$$

отсюда в силу (7) имеем

$$\begin{aligned} \|\mathbf{x}_i^{(k+1)}(t) - \mathbf{x}_i(t)\| &\leq \left( \|\mathbf{x}_i^{(k+1)}(t_r) - \mathbf{x}_i(t_r)\| + L_s^{\tilde{\mathbf{f}}} L_x^{\mathbf{h}} \|\mathbf{x}^{(k)}(t) - \mathbf{x}(t)\| \Delta t_r \right) \exp(L_x^{\tilde{\mathbf{f}}} \Delta t_r), \\ i &= 1, n, \quad t \in [t_r; t_{r+1}], \quad r = 0, N-1; \end{aligned}$$

отсюда, введя обозначение

$$q = n L_s^{\tilde{\mathbf{f}}} L_x^{\mathbf{h}} \Delta t_r \exp(L_x^{\tilde{\mathbf{f}}} \Delta t_r), \quad (10)$$

получим окончательно, просуммировав по всем индексам  $i$ :

$$\|\mathbf{x}^{(k+1)}(t) - \mathbf{x}(t)\| \leq \|\mathbf{x}^{(k+1)}(t_r) - \mathbf{x}(t_r)\| \exp(L_x^{\tilde{\mathbf{f}}} \Delta t_r) + q \|\mathbf{x}^{(k)}(t) - \mathbf{x}(t)\|, \quad t \in [t_r; t_{r+1}], \quad r = 0, N-1. \quad (11)$$

Возьмем, используя (8), разбиение  $[t_0; t_0 + T] = \bigcup_{r=0}^{N-1} [t_r; t_{r+1}]$ ,  $t_0 + T = t_N$  таким образом, чтобы

$$nL_s^f L_x^h \Delta t_r \exp(L_x^f \Delta t_r) < 1;$$

отсюда в силу (10) имеем

$$q < 1. \quad (12)$$

Рассмотрим  $r = 0$ . Выражение (11) в таком случае в силу (3) и (5) примет вид

$$\|x^{(k+1)}(t) - x(t)\| \leq q \|x^{(k)}(t) - x(t)\|, \quad t \in [t_0; t_1];$$

отсюда следует равномерная сходимость  $x^{(k)}(t)$  к  $x(t)$  при  $t \in [t_0; t_1]$  в случае  $r = 0$ . Отсюда для  $r = 1$  из (11) вытекает равномерная сходимость  $x^{(k)}(t)$  к  $x(t)$  при  $t \in [t_1; t_2]$ . Аналогично для произвольных  $r$  можно доказать равномерную сходимость  $x^{(k)}(t)$  к  $x(t)$  при  $t \in [t_r; t_{r+1}]$ ,  $r = 0, N - 1$ .

Из равномерной сходимости  $x^{(k)}(t)$  к  $x(t)$  при  $t \in [t_r; t_{r+1}]$ ,  $r = 0, N - 1$  в силу (9) вытекает равномерная сходимость  $s^{(k)}(t)$  к  $s(t)$  при  $t \in [t_r; t_{r+1}]$ ,  $r = 0, N - 1$ . Отсюда в силу (4) и (6) вытекает равномерная сходимость ТХ  $y^{(k)}(t)$  к  $y(t)$  при  $t \in [t_r; t_{r+1}]$ ,  $r = 0, N - 1$  из свойств непрерывности соответствующих функционалов в (4) и (6).

Итак, мы видим, что итерации (5) и (6) сходятся к решению (1) и (2), эквивалентных (3) и (4). ПД в (5) и (6) мы вводим путем описанных в [15] разрывов по термодинамическим силам, координатам состояния, коэффициентам кинетических матриц, связи которых более слабые, чем те, которые мы сохраняем [15]. Это делает возможным брать разбиение  $[t_0; t_0 + T] = \bigcup_{r=0}^{N-1} [t_r; t_{r+1}]$ ,  $t_0 + T = t_N$  на меньшее число отрезков, что упрощает расчет и уменьшает число итераций (видно из (10) и (11)).

Таким образом, выражения (5) и (6) представляют собой итерации, которые мы реализовываем независимо друг от друга (параллельно [18]) с последующим уточнением результата моделирования (синхронизация путем обмена сообщениями [18]). На одном компьютере итерации (5) и (6) также распараллеливаются средствами моделирующей среды (modelica), основанной на аппаратной конфигурации [18], на создании потоков [18]. Примером среды modelica, в которой реализован потенциально-поточный метод, является scilab [13]. В соответствии с работами [6, 8] эти итерации крутятся для каждой совокупности значений неизвестных параметров, входящих в потенциально-поточные уравнения.

### Распределенное построение математической модели

В работе [17] было показано, что математическая модель произвольного заданного ТО строится (из уравнений ППМ) по частям, т.е. сложные модели в этом множестве сводятся к частным (более простым) моделям, настраиваются параметры этих простых моделей, затем эти частные модели объединяются в более общую модель [17]. В общем случае такие модели имеют вид [6–8, 17]

$$y^{(o)}(t) = q(y^{(i)}(t), \bar{u}(t), w, p), \quad t \in [t_0; t_0 + T], \quad (13)$$

где  $y^{(o)}(t)$  – ТХ системы  $y(t)$ , являющиеся выходными параметрами модели (ненаблюдаемые ТХ системы);  $y^{(i)}(t)$  – ТХ системы  $y(t)$ , являющиеся входными параметрами модели (наблюдаемые ТХ системы);  $\bar{u}(t)$  – известные внешние воздействия на систему  $u(t)$  (и их производные);  $p$  – настраиваемые параметры модели;  $w$  – формальные параметры модели [6, 8, 17]. Эти параметры  $p$  настраиваются на множестве динамик ТХ, полученных из уравнений ППМ (рис. 1) для различных совокупностей значений неизвестных параметров уравнений ППМ [6–8, 17]. Из всего множества моделей (13) выбирается та модель, которая после настройки параметров  $p$  лучше

описывает связь между ТХ объекта и известными внешними воздействиями на рассматриваемый ТО, вытекающую из потенциально-поточковых уравнений ФХП в нем [6–8, 17].

Упомянутая выше и в работе [17] декомпозиция модели (13) аналогична описанной в работе [15] декомпозиции уравнений ППМ. С этой целью, как и ранее, уравнение (13) представим в виде (вытекает из [17])

$$\mathbf{y}_j^{(o)}(t) = \mathbf{q}_j(\mathbf{y}_j^{(i)}(t), \bar{\mathbf{u}}_j(t), \mathbf{p}_j, \bar{\mathbf{s}}_j(t)), \quad \bar{\mathbf{s}}_j(t) = \bar{\mathbf{h}}_j(\mathbf{y}_j^{(i)}(t), \bar{\mathbf{u}}(t), \mathbf{p}), \quad t \in [t_{0,j}; t_{0,j} + T_j], \quad j = 1, n_m, \quad (14)$$

где  $\mathbf{y}_j^{(o)}(t)$ ,  $t \in [t_0; t_0 + T]$ ,  $j = 1, n_m$  – все или некоторые ненаблюдаемые ТХ объекта  $\mathbf{y}^{(o)}(t)$  в  $j$ -м представлении модели (13);  $\mathbf{y}_j^{(i)}(t)$ ,  $t \in [t_0; t_0 + T]$ ,  $j = 1, n_m$  – все или некоторые наблюдаемые ТХ объекта  $\mathbf{y}^{(i)}(t)$  в  $j$ -м представлении модели (13);  $\bar{\mathbf{u}}_j(t)$ ,  $t \in [t_0; t_0 + T]$ ,  $j = 1, n_m$  – все или некоторые известные внешние воздействия на объект  $\bar{\mathbf{u}}(t)$  в  $j$ -м представлении модели (13);  $\mathbf{p}_j$ ,  $j = 1, n_m$  – некоторые настраиваемые параметры  $\mathbf{p}$  модели (13) в  $j$ -м ее представлении;  $[t_{0,j}; t_{0,j} + T_j] \subset [t_0; t_0 + T]$ ,  $j = 1, n_m$ , причем отрезки  $[t_{0,j}; t_{0,j} + T_j]$ ,  $j = 1, n_m$  полностью покрывают отрезок  $[t_0; t_0 + T]$ ;  $n_m$  – число представлений (14) модели (13).

Используя (14), модели (13) сведем к упрощенным частным моделям (аналогично [17]):

$$\mathbf{y}_j^{(o)}(t) = \mathbf{q}_j(\mathbf{y}_j^{(i)}(t), \bar{\mathbf{u}}_j(t), \mathbf{p}_j^{(k+1)}, \bar{\mathbf{s}}_j^{(k)}(t)), \quad \bar{\mathbf{s}}_j^{(k)}(t) = \bar{\mathbf{h}}_j(\mathbf{y}_j^{(i)}(t), \bar{\mathbf{u}}(t), \mathbf{p}^{(k)}), \quad t \in [t_{0,j}; t_{0,j} + T_j], \quad j = 1, n_m, \quad (15)$$

где  $k$  – номер итерации. На каждой  $k$ -й итерации  $\mathbf{p}_j^{(k+1)}$ ,  $j = 1, n_m$  находится путем аппроксимации динамик ТО, полученных из уравнений ППМ (рис. 1) при различных значениях неизвестных параметров, входящих в эти уравнения (методами [6–8]), при фиксированных  $\bar{\mathbf{s}}_j^{(k)}(t)$ ,  $j = 1, n_m$ ,  $t \in [t_0; t_0 + T]$ . Отсюда в силу сказанного выше (в том числе и в силу (15)) параметры  $\mathbf{p}_j^{(k+1)}$ ,  $j = 1, n_m$  являются функционалом  $\bar{\mathbf{s}}_j^{(k)}(t)$ ,  $\mathbf{y}_j^{(o)}(t)$ ,  $\mathbf{y}_j^{(i)}(t)$ ,  $\bar{\mathbf{u}}_j(t)$ ,  $j = 1, n_m$ ,  $t \in [t_0; t_0 + T]$ :

$$\mathbf{p}_j^{(k+1)} = \mathbf{r}_j[\mathbf{y}_j^{(o)}(t), \mathbf{y}_j^{(i)}(t), \bar{\mathbf{u}}_j(t), \bar{\mathbf{s}}_j^{(k)}(t)], \quad \bar{\mathbf{s}}_j^{(k)}(t) = \bar{\mathbf{h}}_j(\mathbf{y}_j^{(i)}(t), \bar{\mathbf{u}}(t), \mathbf{p}^{(k)}), \quad j = 1, n_m. \quad (16)$$

Выстроив аналогичные рассуждения для (14), получим

$$\mathbf{p}_j = \mathbf{r}_j[\mathbf{y}_j^{(o)}(t), \mathbf{y}_j^{(i)}(t), \bar{\mathbf{u}}_j(t), \bar{\mathbf{s}}_j(t)], \quad \bar{\mathbf{s}}_j(t) = \bar{\mathbf{h}}_j(\mathbf{y}_j^{(i)}(t), \bar{\mathbf{u}}(t), \mathbf{p}), \quad j = 1, n_m. \quad (17)$$

Полученное выражение (16) представляет собой прямые итерации [20]. Если в (16) выполняется условие сходимости прямых итераций [20], то эти итерации сходятся к (17) [20], т.е.  $\exists \lim_{k \rightarrow \infty} \mathbf{p}^{(k)} = \mathbf{p}$  [20]. Таким образом, выражения (15) являются частными моделями (13) тогда и только тогда, когда выполняются условия сходимости прямых итераций (16).

Модели (15) выбираются еще и так, чтобы они по частям поместились в памяти ЭВМ. Это дает возможность частные модели настраивать, используя (16), параллельно на разных ЭВМ на каждой итерации. Затем эти итерации повторяются. Получив формальную модель ТО, мы также в параллель на разных компьютерах исследуем статистическими методами из ЭД формальные параметры полученных моделей, получив тем самым модель системы [7].

### Структура программно-аппаратного комплекса, реализующего формализм построения математических моделей технических объектов

Описанные операции стадий построения математической модели ТО выполняются в моделирующей среде (modelica, например, scilab/xcos), которая запускается на каждой ЭВМ (рис. 2). Эти компьютеры координируются специальной распределенной программой, реализующей запуск моделирующей среды на каждом компьютере, базу данных (блок-схем различных ФХП, функций моделей систем, функций состояний для свойств веществ и процессов), а также взаимодействующий с пользовательским интерфейсом (рис. 2) [18].

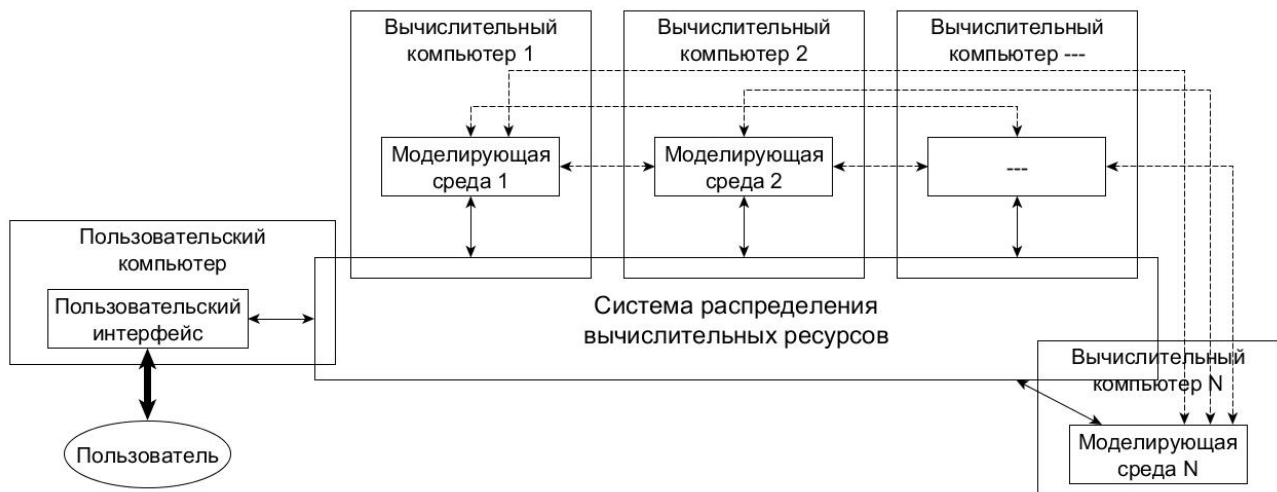


Рис. 2. Структура программной реализации построения модели технического объекта.  
Пунктирные линии – обмен сообщениями между вычислительными процессами

Также возможно подключение панели сбора данных на некоторые компьютеры со сбором ЭД и с заданием управляющего сигнала. Обработку собранных ЭД, а также планирование управляющих воздействий можно реализовать в моделирующей среде.

Пользовательский интерфейс включает в себя генерацию кода, отображение модели ТО, закон управления ТО, выбранные параметры ТО, и т.д.

### Заключение

Итак, в настоящей работе была получена структура программной реализации методологии построения математической модели ТО из анализа ФХП в нем и ЭД. Так как эта реализация подразумевает распараллеливание по разным компьютерам, а также эта система горизонтально масштабируемая, то такая реализация позволит решать задачи построения модели произвольной сложности со сбором необходимых экспериментальных данных и экспериментальной проверкой полученной модели (благодаря панели сбора данных и задания сигнала).

### Библиографический список

1. Старостин, И. Е. К проблеме программной реализации методов моделирования и идентификации параметров физико-химических процессов в энергетике / И. Е. Старостин, А. Г. Степанкин, М. Л. Тюляев, В. В. Лавров // Научные чтения по авиации, посвященные памяти Н. Е. Жуковского : сб. тр. XIV Всерос. науч.-техн. конф. – Москва : Экспериментальная мастерская «НаукаСофт», 2017. – С. 498–508.
2. Колодежный, Л. П. Надежность и техническая диагностика : учебник для вузов / Л. П. Колодежный, А. В. Чернодаров. – Москва : ВУНЦ ВВС ВВА им. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина, 2010. – 452 с.
3. Бессекерский, В. А. Теория систем автоматического управления : учебник / В. А. Бессекерский, Е. П. Попов. – Санкт-Петербург : Профессия, 2003. – 752 с.
4. Крутько, П. Д. Обратные задачи динамики в теории автоматического управления : цикл лекций / П. Д. Крутько. – Москва : Машиностроение, 2004. – 576 с.
5. Харьков, В. П. Адаптивное управление динамической системой на основе обратных задач динамики / В. П. Харьков // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2016. – Т. 1. – С. 176–177.
6. Starostin, I. E. Identification of system models from potential-stream equations of the basis of deep learning on experimental data / I. E. Starostin, S. P. Khaluytin // Civil Aviation High Technologies. – 2020. – Vol. 23 (2). – P. 47–58.
7. Старостин, И. Е. Получение моделей надежности технических объектов из потенциально-поточковых уравнений физико-химических процессов в этих объектах / И. Е. Старостин // Надежность и качество сложных систем. – 2020. – № 1 (29). – С. 6–13.
8. Старостин, И. Е. К вопросу программной реализации методики получения математической модели эксплуатируемого объекта из потенциально-поточковых уравнений физико-химических процессов / И. Е. Старостин // Научные горизонты. – 2019. – № 11 (27). – С. 214–230.

9. Эткин, В. А. Энергодинамика: синтез теорий переноса и преобразования энергии : монография / В. А. Эткин. – Санкт-Петербург : Наука, 2008. – 409 с.
10. Jou, D. Extended irreversible thermodynamics / D. Jou, J. Casas-Vázquez, G. Lebon. – New York, USA : Springer, 2006. – 528 p.
11. Полак, Л. С. Неравновесная химическая кинетика и ее применение : монография / Л. С. Полак. – Москва : Наука, 1979. – 248 с.
12. Starostin, I. E. Kinetic theorem of modern non-equilibrium thermodynamic : monograph / I. E. Starostin, V. I. Bykov. – Raleigh (North Carolina, USA) : Open Science Publishing, 2017. – 229 p.
13. Старостин, И. Е. Программная реализация методов современной неравновесной термодинамики и система симуляции физико-химических процессов SimulationNonEqProcSS v.0.1.0 : монография / И. Е. Старостин, А. Г. Степанкин. – Бо Бассен, Маврикий : Lambert academic publishing, 2019. – 127 с.
14. Старостин, И. Е. Алгоритм численного интегрирования потенциально-поточковых уравнений в сосредоточенных параметрах с контролем корректности приближенного решения / И. Е. Старостин // Компьютерные исследования и моделирование. – 2014. – Т. 6, № 4. – С. 479–493.
15. Старостин, И. Е. Упрощение потенциально-поточковых уравнений динамики физико-химических процессов для получения математической модели системы / И. Е. Старостин, С. П. Халютин, В. И. Быков // Сложные системы. – 2019. – № 3 (32). – С. 82–97.
16. Старостин, И. Е. Задание функций состояния для величин, входящих в формализм потенциально-поточкового метода описания динамики физико-химических процессов / И. Е. Старостин // Инновационные информационные и коммуникационные технологии : материалы XVI Междунар. науч.-практ. конф. – Москва : Ассоциация выпускников и сотрудников ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 2019. – С. 317–322.
17. Старостин, И. Е. Программная реализация на базе СКМ Scilab методологии построения математической модели системы из уравнений физико-химических процессов в ней / И. Е. Старостин // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2020. – Т. 1. – С. 41–44.
18. Воеводин, В. В. Параллельные вычисления : учеб. пособие / В. В. Воеводин, Вл. В. Воеводин. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2002. – 608 с.
19. Сансоне, Дж. Обыкновенные дифференциальные уравнения : монография / Дж. Сансоне. – Москва : Изд-во иностранной литературы, 1953. – 346 с.
20. Калиткин, Н. Н. Численные методы : учебник для вузов / Н. Н. Калиткин. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2011. – 592 с.

## References

1. Starostin I. E., Stepankin A. G., Tyulyaev M. L., Lavrov V. V. *Nauchnye chteniya po aviatsii, posvyashchennye pamyati N. E. Zhukovskogo: sb. tr. XIV Vseros. nauch.-tekhn. konf.* [Scientific readings on aviation dedicated to the memory of N. E. Zhukovsky: proceedings of the XIV all-Russian scientific and technical conference]. Moscow: Eksperimental'naya masterskaya «NaukaSoft», 2017, pp. 498–508. [In Russian]
2. Kolodezhnyy L. P., Chernodarov A. V. *Nadezhnost' i tekhnicheskaya diagnostika: uchebnik dlya vuzov* [Reliability and technical diagnostics: textbook for Universities]. Moscow: VUNTs VVS VVA im. N. E. Zhukovskogo i Yu. A. Gagarina, 2010, 452 p. [In Russian]
3. Bessekerskiy V. A., Popov E. P. *Teoriya sistem avtomaticheskogo upravleniya: uchebnik* [Theory of automatic control systems: textbook]. Saint-Petersburg: Professiya, 2003, 752 p. [In Russian]
4. Krut'ko P. D. *Obratnye zadachi dinamiki v teorii avtomaticheskogo upravleniya: tsikl lektsiy* [Inverse problems of dynamics in automatic control theory: a series of lectures]. Moscow: Mashinostroyeniye, 2004, 576 p. [In Russian]
5. Khar'kov V. P. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2016, vol. 1, pp. 176–177. [In Russian]
6. Starostin I. E., Khaluytin S. P. *Civil Aviation High Technologies*. 2020, vol. 23 (2), pp. 47–58.
7. Starostin I. E. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2020, no. 1 (29), pp. 6–13. [In Russian]
8. Starostin I. E. *Nauchnye gorizonty* [Scientific horizons]. 2019, no. 11 (27), pp. 214–230. [In Russian]
9. Etkin V. A. *Energodinamika: sintez teoriy perenosa i preobrazovaniya energii: monografiya* [Energy dynamics: synthesis of energy transfer and transformation theories: monograph]. Saint-Petersburg: Nauka, 2008, 409 p. [In Russian]
10. Jou D., Casas-Vázquez J., Lebon G. *Extended irreversible thermodynamics*. New York, USA: Springer, 2006, 528 p.
11. Polak L. S. *Neravnovesnaya khimicheskaya kinetika i ee primeneniye: monografiya* [Non-equilibrium chemical kinetics and its application : a monograph]. Moscow: Nauka, 1979, 248 p. [In Russian]
12. Starostin I. E., Bykov V. I. *Kinetic theorem of modern non-equilibrium thermodynamic: monograph*. Raleigh (North Carolina, USA): Open Science Publishing, 2017, 229 p.

13. Starostin I. E., Stepankin A. G. *Programmnaya realizatsiya metodov sovremennoy neravnovesnoy termodinamiki i sistema simulyatsii fiziko-khimicheskikh protsessov SimulationNonEqProcSS v.0.1.0: monografiya* [Software implementation of methods of modern non-equilibrium thermodynamics and a system for simulating physical and chemical processes SimulationNonEqProcSS V. 0. 1. 0: monograph]. Bo Bassen, Mavrikiy: Lambert academic publishing, 2019, 127 p. [In Russian]
14. Starostin I. E. *Kompyuternye issledovaniya i modelirovanie* [Computer research and modeling]. 2014, vol. 6, no. 4, pp. 479–493. [In Russian]
15. Starostin I. E., Khalyutin S. P., Bykov V. I. *Slozhnye sistemy* [Complex system]. 2019, no. 3 (32), pp. 82–97. [In Russian]
16. Starostin I. E. *Innovatsionnye informatsionnye i kommunikatsionnye tekhnologii: materialy XVI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Innovative information and communication technologies: proceedings of the XVI international conference. scientific-practical conf.]. Moscow: Assotsiatsiya vypusknikov i sotrudnikov VVIA im. prof. N. E. Zhukovskogo, 2019, pp. 317–322. [In Russian]
17. Starostin I. E. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2020, vol. 1, pp. 41–44. [In Russian]
18. Voevodin V. V., Voevodin V. V. *Parallel'nye vychisleniya: ucheb. posobie* [Parallel computing: tutorial]. Saint-Petersburg: BKhV-Peterburg, 2002, 608 p. [In Russian]
19. Sansone Dzh. *Obyknovennyye differentsial'nye uravneniya: monografiya* [Ordinary differential equations: monograph]. Moscow: Izd-vo inostrannoy literatury, 1953, 346 p. [In Russian]
20. Kalitkin N. N. *Chislennyye metody: uchebnik dlya vuzov* [Numerical methods: textbook for Universities]. Saint-Petersburg: BKhV-Peterburg, 2011, 592 p. [In Russian]

**Старостин Игорь Евгеньевич**

кандидат технических наук, доцент,  
кафедра электротехники  
и авиационного электрооборудования,  
Московский государственный технический  
университет гражданской авиации  
(Россия, г. Москва, Кронштадтский бульвар, 20)  
E-mail: starostinigo@yandex.ru

**Starostin Igor' Evgen'evich**

candidate of technical sciences, associate professor,  
sub-department of electrical engineering  
and aviation electrical equipment,  
Moscow State Technical  
University of Civil Aviation  
(20 Kronshtadtsky Boulevard, Moscow, Russia)

**Образец цитирования:**

Старостин, И. Е. Программная реализация решения потенциально-потокным методом задач построения моделей систем из результатов испытаний этих систем / И. Е. Старостин // Надежность и качество сложных систем. – 2020. – № 3 (31). – С. 128–136. – DOI 10.21685/2307-4205-2020-3-15.

## **ДИКУСАР ВАСИЛИЙ ВАСИЛЬЕВИЧ**

**(30.12.1937–24.10.2020)**

Скончался блестящий ученый, яркий педагог, выдающийся специалист в области оптимального управления, вариационных задач, математического программирования, профессор Василий Васильевич Дикусар.

Он родился 30 декабря 1937 г. в Одессе, в 1966 г. окончил МФТИ, а в 1970 г. после обучения в аспирантуре МФТИ и МГУ защитил кандидатскую диссертацию на тему «Некоторые вариационные задачи динамики полета в атмосфере при наличии ограничений». После защиты диссертации «Методика численного решения краевых вариационных задач для систем обыкновенных дифференциальных уравнений» в 1982 г. стал доктором физико-математических наук. Работал в ЦАГИ (1963–1973), ИПУ РАН (1973–1988), Вычислительном центре им. А. А. Дородницына РАН (1988–2018).



В. В. Дикусару принадлежат фундаментальные результаты в области теории оптимального управления и развития подходов к решению сложных задач оптимального управления. Им выполнена пионерская работа решения задачи оптимального управления с нерегулярными смешанными ограничениями на примере задачи входа аппарата в атмосферу с учетом ограничений на величину полной перегрузки. В. В. Дикусар предложил и разработал новый метод синтеза оптимального управления без использования уравнения Риккати. Им разработан метод качественного и численного решения задач оптимального управления при наличии ограничений общего вида на базе схемы Дубовицкого – Милютина. Большое число решенных практических задач подтверждают эффективность разработанной методики. В. В. Дикусар предложил конструктивные методы поиска оптимального управления и оптимальных траекторий в случае вырожденного принципа максимума. Он является автором 130 научных работ и 2 научных изобретений.

В. В. Дикусар был представителем научной школы Алексея Алексеевича Милютина и Георгия Сергеевича Бюшгенса, гордился своими учителями и всю жизнь старался продолжать их научные традиции. В. В. Дикусар придавал исключительное значение педагогической деятельности. Он начал свою преподавательскую деятельность в 1970 г. в МФТИ и много лет продолжал ее (с 1970 по 2010 г. и с 2018 по 2020 г.). Преподавал в Московском государственном открытом университете, Московском гуманитарном университете, являлся руководителем научного семинара в ВЦ РАН «Особые случаи принципа максимума». Был приглашенным профессором в университетах Германии (Мюнхен, Берлин, Гамбург, Обервольфах), Швейцарии (Цюрих, Женева) и Польши (Варшава, Радом, Кельце, Седлице). Был членом международной ассоциации франкоговорящих профессоров экономики, управления и смежных дисциплин Institut

CEDIMES. В. В. Дикусар свободно говорил на французском, польском и немецком языках. Подготовил 18 кандидатов и 10 докторов наук.

За свою многолетнюю плодотворную научную и педагогическую деятельность В. В. Дикусар награжден медалью в честь М. В. Ломоносова, медалью в честь 50-летия со дня полета Ю. А. Гагарина, Почетной грамотой ФИЦ ИУ РАН.

В. В. Дикусар пользовался уважением коллег и обладал непререкаемым авторитетом. Поражала широта и глубина его познаний. Он схватывал на лету суть обсуждаемой проблемы и предлагал прорывные методы ее решения.

Долгая и насыщенная жизнь В. В. Дикусара была без остатка посвящена любимому делу – научной и педагогической работе. До последнего времени он вел плодотворную научную работу, активно публиковал результаты, в том числе опубликовал в нашем журнале четыре научные статьи. Очередную свою статью он обещал прислать 24 февраля этого года, но...

Василий Васильевич уделял много внимания работе со своими учениками, был прямым, открытым и отзывчивым человеком. Его отличали острый ум, великолепное чувство юмора, доброжелательность, умение точно сформулировать проблему, наметить оптимальный путь решения и доступно объяснить многие математические понятия и факты. Для своих учеников и коллег он был верным другом и надежной опорой. Идеи и разработанные им методы служат отправной точкой для дальнейших исследований. Жизнь Василия Васильевича Дикусара – яркий пример беззаветного служения науке и Родине.