

# **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН, КОМПЛЕКСОВ И КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ**

DOI 10.54398/2074-1707\_2022\_1\_77

УДК 004:9

## **ЭЛЕМЕНТЫ НЕЧЕТКО-ГРАНУЛЯРНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ В ПРИЛОЖЕНИИ К ЗАДАЧАМ АНАЛИЗА ТЕХНИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ**

*Статья поступила в редакцию 15.01.2022, в окончательном варианте – 30.01.2022.*

**Михайличенко Антон Валерьевич**, Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного, 194064, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, пр. Тихорецкий, 3, адъюнкт, e-mail: antoxa9111603538@gmail.com

**Паращук Игорь Борисович**, Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного, 194064, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, пр. Тихорецкий, 3, доктор технических наук, профессор, e-mail: shchuk@rambler.ru

Исследованы важные особенности применения нечетко-гранулярных вычислительных методов для анализа технической надежности систем распределенной обработки данных. Нечетко-гранулярные вычисления нацелены на уточнение (верификацию) неточных, «зашумленных» нечетких исходных данных большой размерности, необходимых для решения подобных задач анализа. Рассмотрены этапы, физическая сущность и математические аспекты подходов, реализующих информационное гранулирование и нечетко-гранулярные вычисления, позволяющих нивелировать нечеткость, «зашумление», неупорядоченность и неформализованность при формировании исходных данных для моделирования и текущей оценки параметров технической надежности систем такого класса. Применение предложенных нечетко-гранулярных методов в практике разработчиков и инженеров-исследователей позволит повысить объективность задания исходных данных как на этапе синтеза системы показателей технической надежности, так и на этапе формирования математической модели, что в итоге позволит повысить адекватность и точность анализа надежности реальных сложных информационных систем.

**Ключевые слова:** техническая надежность, нечетко-гранулярные вычисления, нечеткие исходные данные, метод, анализ, система распределенной обработки данных, показатель

## **ELEMENTS OF FUZZY-GRANULAR COMPUTING IN APPLICATION TO THE TASKS OF ANALYZING THE TECHNICAL RELIABILITY OF DISTRIBUTED DATA PROCESSING SYSTEMS**

*The article was received by editorial board 15.01.2022, in the final version – 30.01.2022*

**Mikhailichenko Anton V.**, Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny, 3 Tikhoretsky Ave., St. Petersburg, 194064, Russian Federation, post-graduate student, e-mail: antoxa9111603538@gmail.com

**Parashchuk Igor B.**, Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny, 3 Tikhoretsky Ave., St. Petersburg, 194064, Russian Federation, Doct. Sci. (Engineering), Professor, e-mail: shchuk@rambler.ru

The important features of the application of fuzzy-granular computational methods in the interests of analyzing the technical reliability of distributed data processing systems are investigated. Fuzzy-granular computing are aimed at clarifying (verifying) inaccurate, “noisy” fuzzy source data of large dimension necessary for solving such analysis problems. The stages, physical essence and mathematical aspects of approaches implementing information granulation and fuzzy-granular calculations are considered, allowing to level out the fuzziness, “noise”, disorder and informality in the formation of initial data for modeling and current evaluation of the parameters of technical reliability of systems of this class. The application of the proposed fuzzy-granular methods in the practice of developers and research engineers will increase the objectivity of the initial data assignment both at the stage of synthesis of the system of technical reliability indicators and at the stage of formation of a mathematical model, which, ultimately, will increase the adequacy and accuracy of the reliability analysis of real complex information systems.

**Keywords:** technical reliability, fuzzy-granular computing, fuzzy source data, method, analysis, distributed data processing system, indicator

## Graphical annotation (Графическая аннотация)



**Введение.** Неуклонное и всестороннее совершенствование технологий и средств автоматизации оперативной обработки, хранения и интеллектуального анализа больших массивов информации является нормой современного эволюционного развития ИТ-инфраструктуры страны и обязательной процедурой в рамках «цифровой трансформации» многих аспектов деятельности нашего государства.

В этой связи проблемы оперативной обработки и доведения до лиц, принимающих решения, достоверной информации во всех звеньях управления промышленностью, финансами, обороной, здравоохранением и другими сферами интересов страны приобретают особую актуальность. С решением именно этих проблем связана специфика перехода на качественно новый уровень управления, все более существенное место в целевых программах развития государства отводится завершению создания и совершенствованию алгоритмов функционирования единого информационного пространства Российской Федерации.

Одним из важнейших элементов единого информационного пространства, узловым компонентом ИТ-инфраструктуры, являются распределенные системы обработки данных (РСОД), к которым относятся как системы распределенных баз данных и центры обработки данных, так и несложные, с точки зрения топологии, при этом мощные вычислительные системы с распределенными ресурсами (многоядерные компьютерные системы), локальные ведомственные (и глобальная) сети, кластеры и «облачные» платформы [1–3].

Пользователь РСОД получает возможность работать с базами и хранилищами данных, прикладными процессами, программами и сервисами, расположенными в нескольких взаимосвязанных оконечных подсистемах или комплексах хранения и обработки данных. Примером РСОД, именуемых в зарубежной научной литературе DDPS (Distributed Data Processing Systems), могут служить как сети хранения данных – SAN (Storage Area Network), так и так называемые IP Storage-решения – комплексы хранения и обработки данных, накопители, доступ к которым осуществляется с использованием IP-технологий [4–6].

При этом распределенные вычислительные ресурсы РСОД должны обладать технологическими возможностями поиска и, главное, возможностями многомерного анализа данных, позволяющего математически корректно обрабатывать информацию и обеспечивать своевременность, достоверность и безопасность ее доведения до должностных лиц и иных пользователей [7–9].

Среди проблем и препятствий, стоящих на пути создания современных РСОД, среди трудностей, сопровождающих процесс их совершенствования, важное место, безусловно, принадлежит проблеме анализа и обеспечения технической надежности систем такого класса.

С учетом этой проблемы, при построении и совершенствовании многих сложных управляемых технических (информационных) систем, на наш взгляд, имеет право на жизнь гипотеза о рациональности применения новых методологических подходов, ориентированных на анализ технической надежности РСОД с учетом современных и перспективных математических методов вычислений, методов, способных обеспечить точность и оперативность анализа технической надежности РСОД даже в условиях неопределенности, нечеткости, неточности («зашумленности») исходных данных большой размерности. Одному из возможных подходов в рамках решения подобных задач посвящена настоящая статья.

**Постановка задачи исследования.** Распределенные системы обработки данных представляют собой развернутые на местности и взаимосвязанные комплексы программно-аппаратных средств для поиска, многопараметрической обработки и многомерного анализа информации. Они служат основой создания высокопроизводительной и отказоустойчивой инфраструктуры, отвечающей за оперативную обработку, хранение и интеллектуальный анализ больших объемов такой

информации. При этом данные системы нацелены на реализацию целого комплекса операций с информацией (попадающих под стандартное определение «обработка данных» или «обработка информации»), проводимых на взаимосвязанных, однако независимых вычислительных машинах.

Распределенные системы обработки данных процессуально построены на основе взаимосвязи функций отдельных комплексов хранения и обработки данных (КХОД). С точки зрения современных технологий вычислений и хранения данных, функции отдельных КХОД часто делят на «облачные», «туманные» и «граничные». С учетом этого можно охарактеризовать общую структуру РСОД как взаимосвязанную совокупность стационарного центрального КХОД, региональных и периферийных КХОД.

При этом центральный КХОД выполняет функции так называемых «облачных» вычислений (Cloud Computing). Стационарные региональные КХОД выполняют задачи, в мировой практике называемые «туманными» вычислениями (Fog Computing), при которых хранение и обработка информации осуществляется либо в рамках самой региональной КХОД, либо в региональной локальной сети, связывающей региональные КХОД и оконечные устройства абонентов. Типичный пример региональных КХОД, которые приближены к реальным пользователям, – средства и комплексы IoT (Internet of Things). Наконец, нижнее звено иерархии РСОД – современные мобильные, либо мини, модульные, «чемоданные» КХОД, ориентированные на «граничные», периферийные вычисления и хранение данных (Edge Computing) [10].

Важное достоинство таких компонентов РСОД – масштабируемость, а общая идея их создания – максимальное «приближение» вычислительных мощностей и ресурсов хранения данных к пользователю, в эталонном варианте – на точку сбора и «потребления» информации, рядом с оконечными устройствами пользователей РСОД.

Особенно актуально это для РСОД, строящихся в интересах обеспечения вычислительными мощностями и ресурсами хранения данных труднодоступных регионов (например, в Арктике), а также тропических и пустынных районов ведения, например, геологоразведки. Мобильные КХОД способны работать в широком диапазоне температур и даже в зонах с высокой вулканической и сейсмоактивностью. Кроме того, мобильные КХОД в большинстве – герметичны, а потому их можно перемещать, например, по грунтовым дорогам, морским (речным) или авиатранспортом.

Помимо удобства транспортировки, у мобильных КХОД, входящих в состав РСОД, есть еще ряд преимуществ:

- доступность вычислительных мощностей и ресурсов хранения данных для пользователей почти в любом месте их повседневной деятельности;
- модульная конструкция с точки зрения технологических решений.
- небольшие размеры и отсутствие требований к развитой инженерной инфраструктуре;
- невысокие энергетические затраты;
- низкая стоимость развертывания по сравнению с традиционными КХОД и дата-центрами;
- темпы изготовления и поставки (в разы быстрее строительства стандартных стационарных элементов РСОД).

Вместе с тем, наряду с безусловными достоинствами: прозрачностью, открытостью, переносимостью приложений, гибкостью, масштабируемостью и безопасностью, к ключевым характеристикам отдельных КХОД и РСОД в целом по праву относят их техническую надежность (ТН).

Под технической надежностью РСОД понимается свойство систем сохранять длительное время в заранее заданных пределах (диапазоне) значения всех своих параметров, характеризующих их способность выполнять требуемые функции в определенных режимах и условиях применения, технического обслуживания и транспортировки. Численно ТН чаще всего описывают средним временем наработки на отказ или вероятностью отказа в работе (вероятностью безотказной работы) и измеряют на определенном временном интервале [11–14].

Несмотря на большое количество исследований в этой области, пока не выработаны единые подходы к созданию достоверных, оперативных механизмов и математических методов анализа ТН сложных технических систем с распределенной структурой. Отсутствуют механизмы и методы, позволяющие максимально точно, в отведенные сроки и с учетом неопределенности наблюдаемых частных параметров ТН, осуществить анализ надежности отдельных КХОД и РСОД в целом. При этом важный объективный фактор – неопределенность, нечеткость исходных данных для анализа ТН РСОД, обуславливает не только теоретическую возможность, но и практическую необходимость, фактическую рациональность привлечения для задач анализа надежности РСОД новых методов. Методов, позволяющих нивелировать неопределенность, нечеткость исходных данных, например, нечетко-гранулярных методов (НГМ), иногда называемых алгоритмами fuzzy-granular computing – нечетко-гранулярных вычислений (НГВ) [15].

**Методологические аспекты анализа технической надежности РСОД на основе методов нечетко-гранулярных вычислений.** Методы нечетко-гранулярных вычислений потенциально способны решать задачи идентификации и анализа большого количества (больших массивов, объемов) нечетко заданных параметров ТН таких сложно структурированных, распределенных и динамических систем, как РСОД, так как могут работать с исходными данными, которые часто носят не только нечеткий, но и неформализованный, зашумленный, неупорядоченный характер.

Нечетко-гранулярные методы учитывают, что нечеткие исходные данные о значениях параметров ТН РСОД могут быть описаны (наблюдаемы) как точные, формализованные и однозначные лингвистические переменные и функции принадлежности, а могут быть избыточными и неточными, неупорядоченными и неформализованными. О таких данных в технической литературе часто говорят, как о «зашумленных» данных [16, 17].

Речь идет о том, что могут быть сформированы (наблюдаемы) массивы данных, математически, в терминах теории нечетких множеств, характеризующие степень принадлежности или непринадлежности конкретного параметра ТН РСОД к определенному конкретному множеству допустимых значений этого параметра. При этом, ввиду большого объема таких данных, существующих ошибок наблюдения и измерения (идентификации), неупорядоченности и слабой их формализованности, такие данные имеют «разброс» значений. Причем в этом случае трудно, а иногда и невозможно идентифицировать точные границы разрозненных множеств (массивов) данных. Именно об этих случаях идет речь, когда подразумевается, что конкретные данные не только нечеткие, но и неточны, «зашумлены».

Нечетко-гранулярные методы позволяют преодолеть проблемы анализа таких «зашумленных» данных, оценивания нечетко сформулированных (наблюдаемых) текущих и прогностических значений параметров ТН РСОД. Для этого в рамках НГМ предлагается использовать информационное гранулирование – слияние массивов нечетко заданных неточных, «зашумленных» исходных данных в группы (информационные гранулы) по принципу семантического и функционального сходства, а также применить математически корректные НГВ, нечетко-гранулярную обработку этих данных.

Предполагается, что НГМ для задачи оценивания параметров ТН РСОД могут быть использованы на двух фазах анализа, в рамках двух последовательных стадий НГВ:

Фаза информационного гранулирования – слияние больших массивов нечетко заданных неточных, «зашумленных» исходных данных о значениях параметров ТН РСОД в информационные гранулы по принципу функционального сходства. На этой фазе данные группируются в гранулы (множества) по принципу сходства функций принадлежности – минимального численного расстояния между значениями большого количества функций принадлежности, которые описывают конкретный нечетко заданный параметр ТН РСОД.

Иными словами, в нашем случае гранулой называется группа параметров ТН РСОД, с точки зрения математики представляющая собой динамическую целостную информационную структуру. Это множество информационных объектов, объединяемых неразличимостью, сходством, близостью (близостью значений функций принадлежности). При этом НГВ как совокупность методов математической обработки и преобразования информационных гранул могут быть использованы в качестве математического и методологического инструмента для обработки нечеткой информации [15, 18–20].

Примером может служить формат представления информационных гранул, индуцированных нечеткостью [18]. Нечеткая гранула (в нашем случае нечеткое множество параметров ТН РСОД) может быть представлена как произведение независимых скалярных экспоненциальных функций. При этом гранула рассматривается, в частности, как тензорное произведение векторов, представляющих собой элементы множества упорядоченных пар – нечетких множеств параметров ТН РСОД и их функций принадлежности, т.е.

$$\{\tilde{\gamma} \mid \mu^{(\gamma)}\} \rightarrow (\tilde{\gamma} \otimes \mu^{(\gamma)}), \quad (1)$$

где  $\tilde{\gamma}$  – нечеткое множество параметров ТН РСОД;  $\mu^{(\gamma)}$  – функция принадлежности нечеткого множества;  $\otimes$  – символ тензорного произведения.

При этом нечеткое множество как информационная гранула – объект, элементы которого ( $\alpha$ -уровни) связаны иерархической структурой, свойства которой определяются матрицей семантического и функционального сходства (сходства расстояний между значениями функций принадлежности, которые описывают конкретный нечетко заданный параметр ТН РСОД). Иными словами, определяется, к какому нечеткому множеству данный конкретный нечетко заданный параметр

ТН РСОД математически (функционально) «тяготеет». Подобные задачи ранее решались в рамках кластеризации [20, 21].

Группировка в гранулы (множества), например, в две гранулы  $\bar{A}^g$  и  $\bar{B}^g$ , по принципу сходства функций принадлежности осуществляется на основе минимального численного расстояния между значениями большого количества  $M$  ( $m = \overline{2, M}$ ;  $M$  может принимать значения от 2 до 100) функций принадлежности, которые описывают конкретный нечетко заданный параметр ТН РСОД

$$\tilde{A} \text{ gran } \bar{A}^g \Leftrightarrow (\min f(\mu_1^{(a)}, \dots, \mu_m^{(a)})), \quad (2)$$

$$\tilde{B} \text{ gran } \bar{B}^g \Leftrightarrow (\min f(\mu_1^{(b)}, \dots, \mu_m^{(b)})), \quad (3)$$

где  $a$  и  $b$  – элементы нечетких множеств  $\tilde{A}$  и  $\tilde{B}$  соответственно;  $\mu_m^{(a)}$  и  $\mu_m^{(b)}$  – функции принадлежности конкретных элементов нечетких множеств  $\tilde{A}$  и  $\tilde{B}$  соответственно; gran – символ информативного гранулирования, физический и математический смысл которого заключается в группировании данных на основе сходства функций принадлежности – минимального численного (функционального  $f$ ) расстояния  $(\min f(\mu_1^{(a)}, \dots, \mu_m^{(a)}))$  и  $(\min f(\mu_1^{(b)}, \dots, \mu_m^{(b)}))$  между значениями большого количества  $m$  функций принадлежности, которые описывают нечетко заданные параметры (группы параметров) ТН РСОД [20, 21].

В итоге получаем, что нечеткие множества  $\tilde{A}$  и  $\tilde{B}$ , характеризующие состав групп нечетко заданных параметров ТН РСОД, соответствуют гранулам  $\bar{A}^g$  и  $\bar{B}^g$ , которые можно записать в виде

$$\bar{A}^g = (a_1 \mu_1^{(a)}; \dots; a_m \mu_m^{(a)}), \quad (4)$$

$$\bar{B}^g = (b_1 \mu_1^{(b)}; \dots; b_m \mu_m^{(b)}). \quad (5)$$

Фаза собственно НГВ – математическая обработка информационных гранул с целью преобразования характеризующих их неточных, «зашумленных», неупорядоченных и неформализованных нечетких исходных данных большой размерности (избыточных данных) к виду, пригодному для осуществления достоверной параметрической оценки ТН РСОД [20, 21].

На этой фазе производится операция гранулярного суммирования над векторами (гранулами)  $\bar{A}^g$  и  $\bar{B}^g$  (иногда записывают  $\bar{A}^g(a)$  и  $\bar{B}^g(b)$ ) и вычисление функции следа гранулярной суммы.

Операция гранулярного суммирования – это, в сущности, операция нечетко-гранулярного математического объединения неточно заданных, «зашумленных» нечетких множеств – исходных данных, характеризующих, в нашем случае, степень уверенности экспертов в количественных значениях параметров ТН РСОД

$$\bar{C}^g(a, b) = \bar{A}^g(a) +_g \bar{B}^g(b), \quad (6)$$

где  $+_g$  – арифметическая операция гранулярного суммирования [15, 20, 21].

Гранулярная сумма подразумевает дефазификацию (преобразование нечеткого множества в четкое число) элементов гранул нечетких множеств и вычисление функции следа гранулярной суммы [19–21].

Например, для гранулы  $\bar{A}^g(a) = (a_1 \mu_1^{(a)}; a_2 \mu_2^{(a)}; a_3 \mu_3^{(a)})$ , содержащей три элемента – три значения нечетко заданного параметра ТН РСОД, входящего в группу параметров ТН (множество)  $\bar{A}^g(a)$ , выражение для дефазификации будет иметь вид

$$a^{(\text{def})} = \left( \sum_{i=1}^3 a_i \mu_i^{(a)} \right) / \left( \sum_{i=1}^3 \mu_i^{(a)} \right). \quad (7)$$

Затем осуществляется минимизация функции следа гранулярной суммы как итог реализации преобразования нечетких и «зашумленных» переменных к точному количественному виду.

Например, для нашего примера, для гранулы  $\bar{A}^g(a)$  как группы параметров ТН, содержащей три элемента – три значения нечетко заданного параметра ТН РСОД, функцию следа гранулярной суммы находят с помощью выражения

$$\text{tr } a = \left( \sum_{i=1}^3 a_i^2 + \mu_i^2 \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (8)$$

Выполняется операция над векторами (гранулами)  $\bar{A}^g(\mu)$  и  $\bar{B}^g(\mu)$ . Это операция минимизации –  $\min(\bar{A}^g(\mu), \bar{B}^g(\mu))$ , т.е.

$$\bar{C}^g(\mu) = \min(\bar{A}^g(\mu), \bar{B}^g(\mu)). \quad (9)$$

Итоговый результат НГВ находят из выражения [19–21]

$$\bar{C}^g = [\bar{C}^{g(a,b)} \bar{C}^g(\mu)] = \begin{pmatrix} a_1 +_g b_1 & \min(\mu_1^{(a)}, \mu_1^{(b)}) \\ \vdots & \vdots \\ a_m +_g b_m & \min(\mu_m^{(a)}, \mu_m^{(b)}) \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Физический смысл результата использования НГМ для задачи анализа ТН РСОД заключается в получении верифицированного (точного, «незашумленного») значения конкретного элемента исходного нечеткого множества, содержащего информацию о количественном значении соответствующего конкретного оцениваемого параметра ТН систем такого класса.

При этом в рамках решения задачи анализа ТН РСОД применение НГМ может быть успешно реализовано на нескольких этапах анализа: на этапе синтеза безызбыточной системы показателей ТН РСОД, на этапе получения экспертных количественных оценок значений конкретного параметра ТН РСОД, а также в рамках синтеза элементов матрицы переходных вероятностей – ключевого компонента марковской математической модели процесса смены состояний показателей ТН в динамике функционирования РСОД [22].

**Заключение.** Таким образом, рассмотренные основы применения нечетко-гранулярных методов позволяют повысить достоверность анализа технической надежности распределенных систем обработки информации за счет уточнения (верификации) неточных, «зашумленных» нечетких исходных данных большой размерности. Эти методы, основанные на информационном гранулировании и нечетко-гранулярных вычислениях, позволяют нивелировать нечеткость, «зашумление», неупорядоченность и неформализованность при формировании исходных данных для моделирования и текущей оценки параметров технической надежности систем такого класса. Это, в свою очередь, позволяет повысить объективность задания этих исходных данных как на этапе синтеза системы показателей ТН, на этапе формирования математической модели, а также на этапе оценивания этих показателей, что в итоге служит повышению адекватности и точности анализа надежности реальных сложных информационных систем.

#### Библиографический список

1. Влацкая, И. В. Распределенная обработка информации : учебное пособие / И. В. Влацкая, С. И. Сорнов. – Оренбург г: ИПК ГОУ ОГУ, 2010. – 146 с.
2. Бабичев, С. Л. Распределенные системы : учебное пособие для вузов / С. Л. Бабичев, К. А. Коньков. – Москва : Юрайт, 2019. – 507 с.
3. Маглинец, Ю. А. Анализ требований к автоматизированным информационным системам / Ю. А. Маглинец. – Москва : Бином. Лаборатория знаний: Интернет-Университет информационных технологий, 2008. – 199 с.
4. Van Steen, M. Distributed Systems / M. Van Steen, A. S. Tanenbaum. – 3rd ed. – Distributed-Systems.Net, 2017. – Режим доступа: <https://www.distributed-systems.net/index.php/books/ds3/>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ. (дата обращения: 13.01.2022).
5. Гусейнов, А. А. Исследование распределенной обработки данных на примере системы Nadoor / А. А. Гусейнов, И. А. Бочкова // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2016. – № 1. – С. 606–608.
6. Puder, A. Distributed systems architecture: a middleware approach / A. Puder, K. Römer, F. Pilhofer. – San Francisco : Morgan Kaufmann Publishers is an imprint of Elsevier, 2006. – 342 p.
7. Андреев, Д. В. Универсальные логические модули для обработки многозначных и континуальных данных / Д. В. Андреев. – Ульяновск : УлГТУ, 2010. – 234 с.
8. Большаков, А. А. Методы обработки многомерных данных и временных рядов : учебное пособие / А. А. Большаков, Р. Н. Каримов. – Москва : Горячая линия-Телеком, 2007. – 522 с.
9. Сазонов, В. В. Математическое обеспечение АСУ войсками : учебное пособие / В. В. Сазонов, И. Б. Парашук, В. А. Логинов, В. В. Елизаров ; под ред. проф. И. Б. Парашука. – Санкт-Петербург : ВАС, 2018. – 256 с.
10. Дмитриев, К. А. Discover the Edge: современные решения для задач будущего / К. А. Дмитриев // ИнформКурьер-Связь. – 2019. – № 3. – С. 58–59.

11. Громов, Ю. Ю. Надежность информационных систем : учебное пособие / Ю. Ю. Громов, О. Г. Иванова, Н. Г. Мосягина, К. А. Набатов. – Тамбов : ГОУ ВПО ТГТУ, 2010. – 160 с.
12. Крюкова, Е.С. Вопросы оценки надежности современных систем хранения данных для мобильных дата-центров / Е. С. Крюкова, В. В. Ткаченко, А. В. Михайличенко, И. Б. Парашук // Научные технологии в космических исследованиях Земли. – 2021. – Т. 13, № 5. – С. 86–95.
13. Гуров, С. В. Надежность систем при неполной информации / С. В. Гуров, Л. В. Уткин. – Санкт-Петербург : Любавич, 1999. – 160 с.
14. Балакирев, В. С. Надежность и диагностика автоматизированных систем : учебное пособие для вузов / В. С. Балакирев, А. А. Большаков. – Санкт-Петербург : Изд-во Политехн. ун-та, 2018. – 144 с.
15. Бутакова, М. А. Элементы теории гранулярных вычислений с нечеткими приближенными информационными гранулами / М. А. Бутакова, А. Н. Гуда, О. В. Иванченко, Е. В. Карпенко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2015. – № 4 (60). – С. 27–33.
16. Стаут, М. Обеспечение целостности данных в зашумленных средах / М. Стаут // Электронные компоненты. – 2012. – № 3. – С. 109–110.
17. Парашук, И. Б. Анализ зашумленных и неоднородных данных о значениях параметров надежности дата-центров / И. Б. Парашук, А. В. Михайличенко, Е. С. Крюкова // Современные технологии: актуальные вопросы теории и практики : сборник статей Международной научно-практической конференции. – Пенза : МЦНС «Наука и Просвещение», 2021. – С. 74–77.
18. Bargiela, A. Granular Computing: An Introduction / A. Bargiela, W. Pedrycz. – N. Y. : Springer, 2003. – 452 p.
19. Pedrycz, W. Handbook of Granular Computing / W. Pedrycz, A. Skowron, V. Kreinovich. – N.Y. : John Wiley & Sons, Ltd, 2008. – 283 p.
20. Минаев, Ю. Н. Гранулярный компьютеринг в системе нечетких множеств на уровне тензорных гранул / Ю. Н. Минаев, О. Ю. Филимонова, Ю. И. Минаева // Проблемы информатизации и управления. – 2012. – № 4 (40). – С. 51–61.
21. Парашук, И. Б. Нейро-нечеткие сети и алгоритмы гранулярных вычислений в задачах интеллектуальной обработки данных для оценки надежности мобильных дата-центров / И. Б. Парашук, Н. В. Михайличенко, А. В. Михайличенко // Применение искусственного интеллекта в информационно-телекоммуникационных системах : сборник материалов научно-практической конференции (31 марта 2021 г., Военная академия связи, Санкт-Петербург). – Санкт-Петербург : ВАС, 2021. – С. 110–115.
22. Крюкова, Е.С. Математическая модель, предназначенная для оценки качества электронной библиотеки: синтез числа градаций пространства состояний / Е. С. Крюкова, И. Б. Парашук // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2020. – № 1 (49). – С. 121–131. – DOI: 10.21672/2074-1707.2020.49.4.121-131.

#### References

1. Vlatskaya I. V., Sormov S. I. *Raspredeleonnaya obrabotka informatsii : uchebnoe posobie* [Distributed information processing : a textbook]. Orenburg, IPK GOU OGU, 2010. 146 p.
2. Babichev S. L., Konkov K. A. *Raspredeleennye sistemy : uchebnoe posobie dlya vuzov* [Distributed systems : a textbook for universities]. Moscow, Yurayt Publ., 2019. 507 p.
3. Maglinets Yu. A. *Analiz trebovaniy k avtomatizirovannym informatsionnym sistemam* [Analysis of requirements for automated information systems]. Moscow, Binom. Laboratoriya znaniy: Internet-Universitet Informatsionnykh tekhnologiy, 2008. 199 p.
4. Van Steen M., Tanenbaum A. S. *Distributed Systems*. 3rd ed. Distributed-Systems.Net, 2017. Available at: <https://www.distributed-systems.net/index.php/books/ds3> (accessed 13.01.2022).
5. Guseynov A. A., Bochkova I. A. Issledovanie raspredeleynoy obrabotki dannykh na primere sistemy Hadoop [The study of distributed data processing on the example of the Hadoop system]. *Aktualnye problemy aviatsii i kosmonavтики* [Actual problems of aviation and cosmonautics], 2016, no. 1, pp. 606–608.
6. Puder, A. Römer K., Pilhofer F. *Distributed systems architecture: a middleware approach*. San Francisco, Morgan Kaufmann Publishers is an imprint of Elsevier, 2006. 342 p.
7. Andreev, D. V. *Universalnye logicheskie moduli dlya obrabotki mnogoznachnykh i kontinualnykh dannykh* [Universal logic modules for processing multi-valued and continuous data]. Ulyanovsk, Ulyanovsk State Technical University, 2010. 234 p.
8. Bolshakov, A. A., Karimov R. N. *Metody obrabotki mnogomernykh dannykh i vremennykh ryadov : uchebnoe posobie* [Methods of processing multidimensional data and time series : textbook]. Moscow, Goryachaya liniya-Telekom Publ., 2007. 522 p.
9. Sazonov, V. V., Parashchuk I. B. (ed.), Loginov V. A., Elizarov V. V. *Matematicheskoe obespechenie ASU voyskami : uchebnoe posobie* [Mathematical support of automated control systems by troops : a textbook]. Saint Petersburg, Military Academy of the Sygnal Corps, 2018. 256 p.
10. Dmitriev, K. A. Discover the Edge: sovremennyye resheniya dlya zadach budushhego [Discover the Edge: modern solutions for the challenges of the future]. *InformKurer-Svyaz* [InformCurrier-Communication], 2019, no. 3, pp. 58–59.
11. Gromov, Yu. Yu., Ivanova, O. G., Mosyagina, N. G., Nabatov, K. A. *Nadezhnost informatsionnykh sistem : uchebnoe posobie* [Reliability of information systems : a textbook]. Tambov, 2010. 160 p.
12. Kryukova, E. S., Tkachenko, V. V., Mikhaylichenko, A. V., Parashchuk, I. B. *Voprosy otsenki nadezhnosti sovremennykh sistem khraneniya dannykh dlya mobilnykh data-tsentrov* [Issues of reliability assessment of modern

data storage systems for mobile data centers]. *Naukoemkie tekhnologii v kosmicheskikh issledovaniyakh Zemli* [High-tech technologies in space exploration of the Earth], 2021, vol. 13, no. 5, pp. 86–95.

13. Gurov, S. V., Utkin, L. V. *Nadezhnost sistem pri nepolnoy informatsii* [Reliability of systems with incomplete information]. Saint Petersburg, Lyubavich Publ., 1999. 160 p.

14. Balakirev, V. S., Bolshakov, A. A. *Nadezhnost i diagnostika avtomatizirovannykh sistem : uchebnoe posobie dlya vuzov* [Reliability and diagnostics of automated systems: a textbook for universities]. Saint Petersburg, Publishing House of Polytechnical University, 2018. 144 p.

15. Butakova, M. A., Guda, A. N., Ivanchenko, O. V., Karpenko, E. V. Elementy teorii granulyarnykh vychisleniy s nechetkimi priblizhennymi informatsionnymi granulami [Elements of the theory of granular computing with fuzzy approximate information granules]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Rostov State University of Railways], 2015, no. 4 (60), pp. 27–33.

16. Staut, M. Obespechenie tselostnosti dannykh v zashumlennykh sredakh [Ensuring data integrity in noisy environments]. *Elektronnye komponenty* [Electronic Components], 2012, no. 3, pp. 109–110.

17. Parashchuk, I. B., Mikhaylichenko, A. V., Kryukova, E. S. Analiz zashumlennykh i neodnorodnykh dannykh o znacheniyakh parametrov nadezhnosti data-tsentrov [Analysis of noisy and heterogeneous data on the values of data center reliability parameters]. *Sovremennyye tekhnologii: aktualnye voprosy teorii i praktiki : sbornik statey Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Modern technologies: topical issues of theory and practice : collection of articles of the International Scientific and Practical Conference]. Penza, MCzNS «Nauka i Prosvetsheniye», 2021, pp. 74–77.

18. Bargiela, A., Pedrycz, W. *Granular Computing: An Introduction*. N.Y., Springer, 2003. 452 p.

19. Pedrycz, W., Skowron, A., Kreinovich, V. *Handbook of Granular Computing*. N.Y., John Wiley & Sons, Ltd, 2008. 283 p.

20. Minaev, Yu. N., Filimonova, O. Yu., Minaeva, Yu. I. Granulyarnyy kompyuting v sisteme nechetkikh mnozhestv na urovne tenzornykh granul [Granular computing in a system of fuzzy sets at the level of tensor granules]. *Problemy informatizatsii i upravleniya* [Problems of informatization and management], 2012, no. 4 (40), pp. 51–61.

21. Parashchuk, I. B., Mikhaylichenko N. V., Mikhaylichenko A. V. Neyro-nechetkie seti i algoritmy granulyarnykh vychisleniy v zadachakh intellektualnoy obrabotki dannykh dlya otsenki nadezhnosti mobilnykh data-tsentrov [Neuro-fuzzy networks and granular computing algorithms in intelligent data processing tasks for assessing the reliability of mobile data centers]. *Primenenie iskusstvennogo intellekta v informatsionno-telekommunikatsionnykh sistemakh : sbornik materialov nauchno-prakticheskoy konferentsii (31 marta 2021 g., Voennaya akademiya svyazi, Sankt-Peterburg)* [Application of artificial intelligence in information and telecommunication systems : collection of materials of the scientific and practical conference (March 31, 2021, Military Academy of Communications, Saint Petersburg)]. Saint Petersburg, Military Academy of the Signal Corps, 2021, pp. 110–115.

22. Kryukova, E. S., Parashchuk, I. B. Matematicheskaya model, prednaznachennaya dlya otsenki kachestva elektronnoy biblioteki: sintez chisla gradatsiy prostranstva sostoyaniy [A mathematical model designed to assess the quality of an electronic library: synthesis of the number of gradations of the state space]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Technologies], 2020, no. 1 (49), pp. 121–131. DOI: 10.21672/2074-1707.2020.49.4.121-131.