

МОДЕЛЬ СЛОЖНЫХ ИНТЕГРИРОВАННЫХ СИСТЕМ

В. П. КОЧИН¹⁾

¹⁾Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

Аннотация. Рассматриваются вопросы проектирования сложных систем. Описываются текущее состояние и эволюция процессов разработки и создания информационных систем. Анализируются основные (классический и системный) подходы к проектированию сложных систем, а также подход, основанный на теории динамического хаоса. По результатам анализа существующих подходов к проектированию сложных систем обосновывается необходимость разработки новых моделей и методов проектирования сложных интегрированных систем. Предлагается модель сложных интегрированных систем, основанная на теории нечетких множеств. Определяются основные параметры модели. Разрабатывается способ задания множества связей сложной интегрированной системы на основе теории графов.

Ключевые слова: сложные интегрированные системы; проектирование сложных интегрированных систем; теория нечетких множеств.

A MODEL OF COMPLEX INTEGRATED SYSTEMS

V. P. KOCHYN^a

^aBelarusian State University, 4 Niezaliezhnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus

Abstract. In this paper, we consider the problem of the design of complex systems. The current state and evolution of information system design and creation processes are described. The main (classical and systematic) approaches to the design of complex systems, as well as an approach based on the theory of dynamic chaos are analysed. Based on the results of the analysis of existing approaches to the design of complex systems, the need to develop new models and methods for the design of complex integrated systems is justified. A model of complex integrated systems based on the fuzzy set theory is proposed. The main parameters of the model are defined. A method for constructing a set of connections of a complex integrated system based on the graph theory is developed.

Keywords: complex system; designing of complex integrated systems; fuzzy set theory.

Введение

Методологии проектирования различных информационных систем развивались с 1950-х гг. На начальном этапе, как правило, они относились к локальным информационным системам.

Быстрое развитие в конце 1990-х – начале 2000-х гг. локальных и глобальных сетей, в первую очередь интернета, создало предпосылки для резкого роста потребностей в различных информационных системах. По сути, процесс их разработки стал носить массовый характер, а сложность возрастала.

Образец цитирования:

Кочин В.П. Модель сложных интегрированных систем. Журнал Белорусского государственного университета. Математика. Информатика. 2024;1:71–78.
EDN: NANGXU

For citation:

Kochyn VP. A model of complex integrated systems. *Journal of the Belarusian State University. Mathematics and Informatics.* 2024;1:71–78. Russian.
EDN: NANGXU

Автор:

Виктор Павлович Кочин – кандидат технических наук, доцент; проректор по учебной работе и интернационализации образования.

Author:

Viktor P. Kochyn, PhD (engineering), docent; vice-rector for academic affairs and internationalisation of education.
kochyn@bsu.by

Все вышесказанное способствовало повсеместному внедрению средств вычислительной техники в различные сферы деятельности государства и общества. На первоначальном этапе осуществлялись оцифровка существующих документов, автоматизация отдельных процессов. Одним из первых направлений автоматизации деловых процессов стала разработка информационных систем управления отдельными процессами предприятий, такими как ведение бухгалтерии, кадровый учет, учет материальных ценностей и т. д. По мере внедрения информационных технологий в производственные и деловые процессы росла сложность информационных систем и сервисов. По этой причине менялись подходы к проектированию информационных систем. Классические подходы уже не позволяли эффективно разрабатывать и внедрять сложные системы. Требовались новые подходы к проектированию, которые могли учитывать сложность систем, возможность их масштабирования, интеграции с другими системами. Вопросам проектирования сложных систем посвящена отдельная научно-методологическая дисциплина – системная инженерия.

Рост сложности информационных систем и сервисов, изменение подходов к проектированию информационных систем были связаны и с эволюцией процессов управления. Предлагаются следующие признаки, отличающие разные стадии эволюции процессов автоматизации и дальнейшей цифровизации различных сфер экономики и деятельности общества:

- автоматизация;
- компьютеризация;
- информатизация;
- цифровая трансформация.

Рассматривая эволюцию процессов автоматизации и цифровизации, можно сделать вывод о том, что степень проникновения цифровых технологий в различные сферы деятельности постоянно возрастает, и это сопровождается изменением систем управления и ростом сложности информационных систем.

Проектирование сложных систем

В настоящее время выделяют два основных подхода к проектированию информационных систем – классический и системный.

Можно отметить следующие отличительные особенности классического подхода:

- проектирование происходит снизу вверх, когда частное объединяется в общее;
- проектируемая система представляет собой сумму всех составных частей, при этом, как правило, не достигается синергетический эффект, при котором появляются новые свойства системы.

Таким образом, проектирование системы на базе классического подхода означает суммирование отдельных элементов в общую систему. Данный подход может быть использован для проектирования относительно простых систем, в которых возможно разделение и взаимно независимое рассмотрение отдельных сторон функционирования целой системы. Для сложных систем такая изолированность суммируемых элементов недопустима, так как приводит к значительным затратам ресурсов при разработке системы.

В общем виде системный подход отличают следующие особенности:

- проектирование осуществляется сверху вниз;
- проектируемая система также может разбиваться на различные подсистемы, которые представляют собой простые системы (в зависимости от выбранной методологии в качестве подсистем могут выступать функции, процессы, структуры и т. д.).

Выделяют следующие свойства системного подхода при проектировании сложных систем.

1. Иерархичность (сложная система разбивается на подсистемы, каждая подсистема рассматривается как отдельный элемент).
2. Структурность (каждая сложная система состоит из различных связанных между собой подсистем).
3. Взаимозависимость (свойства сложной системы проявляются только при взаимодействии составных частей между собой).
4. Множественность описания (сложная система описывается с помощью различных математических моделей).
5. Целостность изучаемой системы (свойства сложной системы изучаются на основе анализа составных подсистем).

В настоящее время существует множество способов и методов, реализующих системный подход.

Можно отметить еще один подход к проектированию сложных систем, основанный на теории динамического хаоса. Так, С. Манн использует теорию динамического хаоса при описании процессов государственного управления [1; 2].

Изначально разработанная как математическая концепция, теория хаоса, также известная как теория динамического хаоса или теория нелинейных математических систем, исследует законы и закономерности

случайных явлений в системах, которые должны подчиняться законам детерминизма. Такие явления (например, атмосферные явления или разнообразные турбулентные процессы в газовых и жидкостных средах, колебания в электрических и магнитно-механических устройствах и т. д.) часто обозначают терминами «динамический хаос» или «детерминированный хаос», чтобы отличить научный термин от общепринятого понятия хаоса как беспорядка. В соответствии с теорией хаоса сложные системы чрезвычайно зависят от первоначальных условий, и небольшие изменения в окружающей среде могут привести к непредсказуемым последствиям. Математические системы с хаотическим поведением являются детерминированными (т. е. подчиняются некоторому строгому закону) и в определенном смысле упорядоченными.

По результатам анализа существующих подходов к проектированию сложных систем можно сделать вывод о том, что они не учитывают (или учитывают не в полной мере) следующие аспекты: текущее состояние и эволюционное развитие элементов систем, интеграционные процессы между составными элементами сложных систем. По этой причине крайне актуальной задачей является разработка новых моделей и методик проектирования сложных систем. В качестве модели, которая будет учитывать указанные аспекты, предлагается модель сложных интегрированных систем. Рассмотренные подходы не в полной мере могут использоваться при проектировании сложных интегрированных систем. Каждый из этих подходов может являться частным случаем проектирования сложных интегрированных систем.

Модель сложных интегрированных систем

Существующие подходы к проектированию сложных информационных систем предназначены для управления различными бизнес-процессами. Как правило, такие системы позволяют управлять отдельными процессами, но при этом имеют интерфейсы взаимодействия с другими системами. При небольших размерах системы существующие подходы обеспечивают достаточно эффективное осуществление цифровой трансформации бизнес-процессов. Однако по мере роста размеров системы фрагментарность методов проектирования не позволяет создавать сложные интегрированные системы, которые дают возможность на системной основе оптимизировать цифровизацию бизнес-процессов.

Сложная интегрированная система – это система, состоящая из множества элементов и имеющая многослойную структуру в программно-технической и организационно-правовой плоскостях. Такая структура обладает большим количеством интегрированных связей как между множеством элементов, так и между слоями. В результате сложная интегрированная система приобретает новые функции и возможности, которые не свойственны отдельным элементам системы. Сложная интегрированная система может состоять как из независимых автономных систем, так и из подсистем и других составных элементов. Составные элементы могут включаться в сложную интегрированную систему полностью либо частично. На рис. 1 показана структурная схема сложной интегрированной системы.

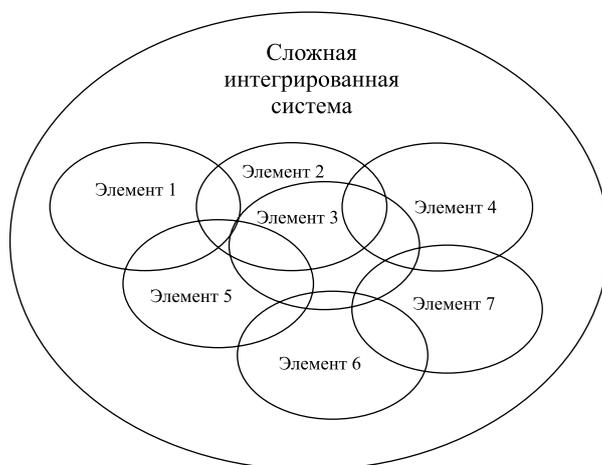


Рис. 1. Структура сложной интегрированной системы

Fig. 1. The structure of a complex integrated system

В широком смысле в качестве сложной интегрированной системы могут выступать различные процессы (например, строительство электростанций, создание сложной системы управления транспортными потоками, проектирование и строительство новых микрорайонов города) и объекты (любая социотехническая система, биологическая система и т. д.). В рамках данной работы объектом исследования являются информационные системы и платформы, а также процессы цифровой трансформации. В статье

рассматриваются процессы проектирования и создания информационных систем различного масштаба: уровня предприятия, учреждения, отрасли, страны и надстранового уровня. Практически все процессы цифровизации государства и общества предполагают создание и развитие сложных интегрированных систем. Главной задачей при разработке методики проектирования таких систем является выделение интеграционных процессов для различных систем, процессов и сервисов.

Проектирование сложных интегрированных систем – это процесс разработки сложных систем с учетом текущего состояния элементов, интеграционных процессов между элементами и функциями, а также выявления новых функций и свойств, полученных в результате создания сложной интегрированной системы.

Сложной интегрированной системе присущи все свойства сложных систем, рассмотренные ранее. С учетом этого любая сложная система является частным случаем сложной интегрированной системы. Как было отмечено выше, сложная интегрированная система имеет ряд отличительных свойств. Основными из них являются следующие свойства, которые в недостаточной степени учитываются известными подходами к проектированию сложных систем.

1. Интегрированность. В настоящее время для сложных систем существует понятие интероперабельности. Согласно ГОСТ Р 55062-2021¹ интероперабельность – это способность двух и более информационных систем или компонентов к обмену информацией и к использованию информации, полученной в результате обмена. Ключевое отличие интегрированности от интероперабельности состоит в том, что взаимодействие и интеграция осуществляются не только между самими системами, но и между различными слоями сложной интегрированной системы. Также свойство интегрированности характеризует степень принадлежности элемента сложной интегрированной системе. Сложными интегрированными системами могут являться системы и платформы различного уровня – от составных подсистем до надстрановых платформ. При их отнесении к сложным интегрированным системам основным критерием будет являться наличие свойства интегрированности.

2. Темпоральность. При проектировании сложных интегрированных систем необходимо учитывать текущее состояние отдельных элементов, которое обусловлено как эволюционным развитием различных процессов и систем, так и объединением составных элементов в одну систему. Данное свойство характеризует степень развития отдельных элементов сложной интегрированной системы.

Согласно определению сложная интегрированная система состоит из множества элементов, каждый из которых состоит из нескольких уровней (слоев). В зависимости от объекта проектирования количество уровней может варьироваться. Применительно к информационным системам можно выделить следующие основные уровни, как показано на рис. 2.

1. Технический уровень (характеризует совокупность технических средств и технологий отдельного элемента сложной интегрированной системы).

2. Программный уровень (описывает совокупность программных решений, интеграционных механизмов; на данном уровне реализуются механизмы API-взаимодействия элементов).

3. Организационный уровень (описывает организационную модель отдельного элемента; по мере роста сложности и размера системы роль данного уровня существенно возрастает).

4. Правовой уровень (определяет правовые основы (положения, приказы, указы, постановления и т. д.) функционирования элемента сложной интегрированной системы).

5. Экономический уровень (определяет стоимость разработки и внедрения, а также совокупного владения системой – один из основных критериев при проектировании сложных интегрированных систем, при этом стоимость сложной интегрированной системы не будет суммой стоимостей отдельных элементов).

Важной отличительной чертой сложной интегрированной системы является интегрированность, которая характеризуется наличием множества связей как между однородными, так и между разнородными плоскостями различных элементов. Количество связей определяется функциями и свойствами сложной интегрированной системы. Например, для реализации определенного функционала может быть только одна связь между правовым уровнем одного элемента и программным уровнем другого элемента (см. рис. 2).

Размер сложных интегрированных систем определяют следующие начальные условия.

1. Уровень процесса. В данном случае объектом проектирования является выделенный процесс предприятия, компании, отрасли, страны. При этом должна обеспечиваться интеграция с другими процессами проектируемого уровня.

2. Уровень предприятия, учреждения. В этом случае, как правило, платформы учитывают производственные и деловые процессы в организации в целом и включают в себя решения для интеграции с иными информационными системами и платформами.

¹ГОСТ Р 55062-2021. Информационные технологии. Интероперабельность. Основные положения. Введ. 30.04.2022. М. : Росин-т стандартизации, 2021. IV, 7 с.

3. Уровень отрасли. В данном случае системы обычно учитывают производственные и деловые процессы в отрасли, а также включают в себя решения для интеграции с цифровыми решениями уровня предприятия, учреждения.

4. Уровень страны. Как правило, этот уровень включает в себя различные отраслевые и ведомственные платформы и системы, аккумулирует все основные информационные потоки и цифровые данные проектируемой платформы странового масштаба. На этом уровне наиболее явно проявляются свойства эмерджентности сложных интегрированных систем. Системы странового масштаба должны реализовывать комплексный подход к внедрению и использованию цифровых решений на уровне страны и интегрировать в себя системы уровня отрасли и предприятия, учреждения.

5. Надстрановой уровень. При проектировании сложных интегрированных систем на надстрановом уровне основные акценты смещаются в сторону согласования форматов данных, организационно-правовых аспектов интеграции. На этом уровне сложным интегрированным системам, как правило, присущи все их основные свойства, описанные выше. Данные системы характеризуются высоким уровнем комплексного взаимодействия между различными странами с использованием цифровых решений. Для разработки и внедрения таких решений необходимо унифицировать подходы по различным направлениям деятельности стран (торговля, налоговая сфера, медицина, образование и т. д.).

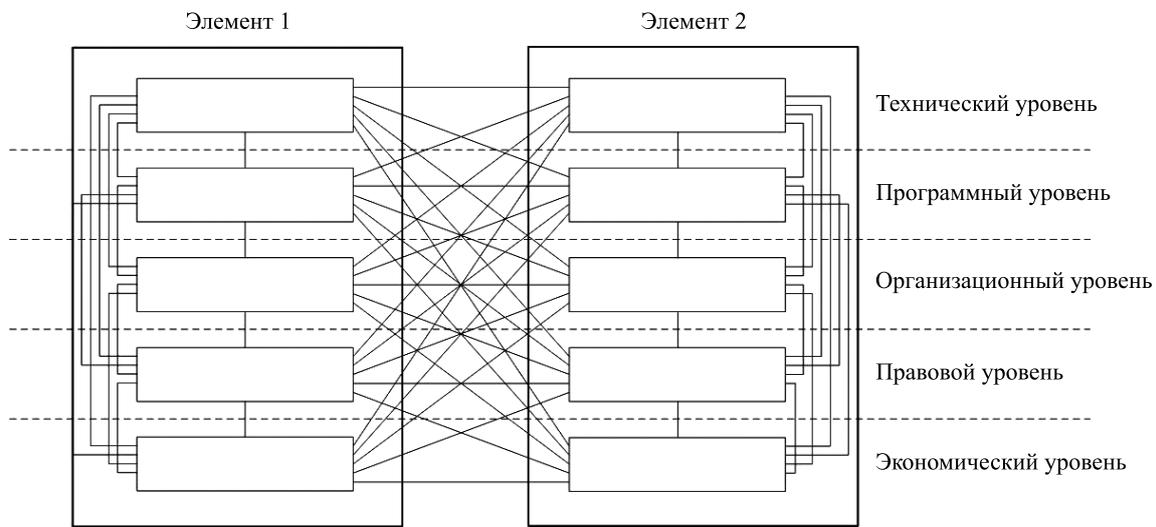


Рис. 2. Модель сложной интегрированной системы

Fig. 2. Model of a complex integrated system

Согласно определению сложная интегрированная система включает в себя множество элементов с различной степенью вхождения на разных уровнях:

$$P = \{P_1; P_2; \dots; P_n\},$$

где P – сложная интегрированная система; P_i – элементы (системы, подсистемы и др.), входящие в состав сложной интегрированной системы. В свою очередь,

$$P_i = \{O_1^i; O_2^i; O_3^i; O_4^i; O_5^i\},$$

где $O_1^i, O_2^i, O_3^i, O_4^i$ и O_5^i – соответственно технический, программный, организационный, правовой и экономический уровни P_i -го элемента сложной интегрированной системы.

Степень вхождения отдельного i -го элемента в сложную интегрированную систему P определяется функцией принадлежности μ_i :

$$P = \left\{ \frac{\mu_i(P_i)}{P_i} \right\},$$

где

$$\mu_i : P_i \rightarrow [0, 1]$$

характеризует степень принадлежности i -го элемента сложной интегрированной системе P на единичном отрезке от 0 до 1.

Таким образом, совокупность функций принадлежности сложной интегрированной системы определяет ее свойства и функциональные возможности, поэтому задание функции принадлежности – важный этап проектирования сложной интегрированной системы.

Следующим этапом проектирования сложной интегрированной системы является задание границ. Для этих целей будут использоваться понятия носителя и высоты сложной интегрированной системы P . Данные характеристики вместе с функцией принадлежности определяют границы сложной интегрированной системы.

Носителем S называется множество всех элементов сложной интегрированной системы P , которые имеют ненулевую функцию принадлежности:

$$S = \{p_i \in P_i : \mu_i(p_i) > 0\}.$$

Высота определяет верхнюю границу $\mu_i(p_i)$, т. е. максимальное значение функции принадлежности:

$$\sup \mu_i(p_i).$$

Таким образом, сложная интегрированная система будет определена как

$$P = \frac{\mu_1(p_1)}{p_1} + \frac{\mu_2(p_2)}{p_2} + \dots + \frac{\mu_i(p_i)}{p_i} = \sum_{i=1}^n \frac{\mu_i(p_i)}{p_i},$$

где n – количество элементов, входящих в сложную интегрированную систему.

Для исключения избыточности элементов в сложной интегрированной системе необходимо применять операции пересечения и объединения элементов.

Пересечением элементов сложной интегрированной системы будет являться новый элемент, определяемый как

$$\mu = \min \{ \mu(p_i); \mu(p_j) \}.$$

Функция принадлежности этого элемента

$$\mu = \mu(p_i) \cdot \mu(p_j).$$

Объединением элементов сложной интегрированной системы будет являться новый элемент, определяемый как

$$\mu = \max \{ \mu(p_i); \mu(p_j) \}.$$

Как следует из определения, сложная интегрированная система имеет многослойную структуру, в которой существует множество интегрированных связей между элементами. По этой причине вместе с функцией принадлежности ключевым показателем сложной интегрированной системы выступает множество связей.

Определим, что каждый слой i -го элемента является вершиной связного графа. Таким образом, множество интегрированных связей сложной интегрированной системы можно представить в виде связного графа.

Существует три основных способа задания графов:

- графический;
- геометрический;
- аналитический.

В графическом способе вершины изображают точками на плоскости, а ребра – линиями, соединяющими соответствующие точки. Данный способ показан на рис. 2. В качестве вершин графов выступают уровни подсистем сложной интегрированной системы, а в качестве ребер – связи между уровнями.

В аналитическом способе граф задается с помощью двух множеств (множества вершин и множества ребер), а также предиката, который указывает, какие вершины с какими ребрами соединены:

$$G = (O; V),$$

$$O = \{O_1^1; O_2^1; \dots; O_5^n\},$$

$$V = \{V_1; V_2; \dots; V_m\},$$

$$K = \{O_j^i; V_l; O_a^z\},$$

где O – множество вершин, в качестве которых выступают уровни подсистем сложной интегрированной системы; V – множество ребер, в качестве которых выступают связи между уровнями подсистем; K – предикат.

Геометрический способ применяется при задании графа матрицей. Матрицей смежности для графа $G = (O; V)$ называется квадратная матрица $A = (a_{ij})$, строкам и столбцам которой соответствуют вершины

графа. Для описания связей между уровнями элементов сложной интегрированной системы будет использоваться неориентированный граф. Для неориентированного графа число a_{ij} равно числу ребер, инцидентных V_i и V_j . Например,

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}.$$

Способ описания графа связей сложной интегрированной системы будет определяться при проектировании конкретной системы исходя из ее размеров и опыта системного архитектора.

При создании сложных интегрированных систем больших размеров (отраслевых, государственных и надгосударственных) следует учитывать, что жизненный цикл таких систем должен быть длительным. Системы этого уровня должны развиваться эволюционным путем, а также в результате модификации (добавления новых и изменения существующих) элементов системы. При изменении структуры и состава сложной интегрированной системы системному архитектору необходимо актуализировать текущее состояние таких характеристик, как носитель, высота, функция принадлежности, и перестраивать систему связей в виде графов.

Таким образом, сложная интегрированная система – это система, которая состоит из множества элементов, имеет четкие границы, определяемые носителем, высотой и функцией принадлежности, выполняет конкретные функции и позволяет на системной основе осуществлять комплексную цифровизацию и оптимизацию различных (ведомственных, отраслевых, государственных и надгосударственных) процессов.

С помощью предложенного подхода были спроектированы и созданы следующие информационные платформы и сервисы:

- информационная система в составе комплекса средств автоматизации зала проведения заседаний Палаты представителей Национального собрания Республики Беларусь;
- интегрированная информационно-коммуникационная система управления университетом [3–5];
- республиканская информационно-образовательная среда [6].

Заключение

По мере развития информационных технологий менялись подходы к проектированию различных информационных систем. Во многом это было обусловлено ростом сложности информационных систем. Традиционные подходы к проектированию не учитывали рост сложности систем и количество интеграционных связей. Таким образом, известные подходы к проектированию информационных систем неэффективны для создания сложных интегрированных систем.

В качестве сложной интегрированной системы может выступать любая социотехническая система, биологическая система и т. д. В рамках данной работы объектом исследования являлись информационные системы и платформы, а также процессы цифровой трансформации различного уровня.

Для проектирования сложных интегрированных систем предложена формальная модель, основанная на методах нечеткой логики. Данная модель учитывает множество связей как между элементами, так и между уровнями.

Библиографические ссылки

1. Mann SR. Chaos theory and strategic thought. *Parameters* [Internet]. 1992 [cited 2023 October 10];22(1):54–68. Available from: <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA528321.pdf>. DOI: 10.55540/0031-1723.1634.
2. Савченко АВ. «Теория хаоса» Стивена Манна и корпоративное управление. *Управление*. 2017;1:72–79. DOI: 10.12737/24704.
3. Кочин ВП, Жерело АВ. Проектирование защищенного отказоустойчивого облачного репозитория письменных работ обучающихся и сотрудников учреждений образования. *Журнал Белорусского государственного университета. Математика. Информатика*. 2021;3:104–108 (на англ.). DOI: 10.33581/2520-6508-2021-3-104-108.
4. Кочин ВП, Жерело АВ. Разработка образовательного защищенного облачного хранилища данных, интегрированного в инфраструктуру образовательного учреждения. *Вестник компьютерных и информационных технологий*. 2022;19(6):21–28. DOI: 10.14489/vkit.2022.06.pp.021-028.
5. Кочин ВП, Воротницкий ЮИ. *Проектирование и обеспечение безопасности интегрированных образовательных информационно-коммуникационных систем*. Минск: БГУ; 2022. 167 с.
6. Курбацкий АН, Воротницкий ЮИ, Зеков МГ, Кочин ВП. О концепции создания и развития республиканской информационно-образовательной среды. В: Тузиков АВ, Григянец РБ, Венгеров ВН, редакторы. *Развитие информатизации и государственной системы научно-технической информации (РИНТИ-2019). Доклады XVIII Международной конференции; 21 ноября 2019 г.; Минск, Беларусь*. Минск: Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси; 2019. с. 19–23.

References

1. Mann SR. Chaos theory and strategic thought. *Parameters* [Internet]. 1992 [cited 2023 October 10];22(1):54–68. Available from: <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA528321.pdf>. DOI: 10.55540/0031-1723.1634.
2. Savchenko AV. Steven Mann's «chaos theory» and corporate governance. *Management (Russia)*. 2017;1:72–79. Russian. DOI: 10.12737/24704.
3. Kochyn VP, Zherelo AV. Designing a secure fail-safe cloud repository of paperworks of students and employees of educational institutions. *Journal of the Belarusian State University. Mathematics and Informatics*. 2021;3:104–108. DOI: 10.33581/2520-6508-2021-3-104-108.
4. Kochyn VP, Zherelo AV. Development of an educational secure cloud data storage integrated into the infrastructure of the Belarusian State University. *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologii*. 2022;19(6):21–28. Russian. DOI: 10.14489/vkit.2022.06.pp.021-028.
5. Kochyn VP, Vorotnitskii YuI. *Proektirovanie i obespechenie bezopasnosti integrirovannykh obrazovatel'nykh informatsionno-kommunikatsionnykh system* [Design and security of integrated educational information and communication systems]. Minsk: Belarusian State University; 2022. 167 p. Russian.
6. Kurbatskii AN, Vorotnitskii YuI, Zekov MG, Kochyn VP. [On the concept of creation and development of the republican information and educational environment]. In: Tuzikov AV, Grigyanets RB, Vengerov VN, editors. *Razvitie informatizatsii i gosudarstvennoi sistemy nauchno-tekhnicheskoi informatsii (RINTI-2019)*. *Doklady XVIII Mezhdunarodnoi konferentsii; 21 noyabrya 2019 g.; Minsk, Belarus'* [Development of informatisation and the state system of scientific and technical information (RINTI-2019). Proceedings of the 18th International conference; 2019 November 21; Minsk, Belarus]. Minsk: United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus; 2019. p. 19–23. Russian.

Получена 21.11.2023 / исправлена 15.02.2024 / принята 15.02.2024.
Received 21.11.2023 / revised 15.02.2024 / accepted 15.02.2024.