

## Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-2-105-123>

## Математическая модель автоматизированной системы обучения игре на фортепиано

А.А. Остренко <sup>1</sup>, М.Н. Рыжкова <sup>1</sup> ✉

<sup>1</sup> Муромский институт (филиал) Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых  
ул. Орловская, д. 23, г. Муром 602224, Российская Федерация

✉ e-mail: [masmash@mail.ru](mailto:masmash@mail.ru)

### Резюме

**Цель исследования.** В наши дни актуальным является автоматизация дистанционного процесса обучения или самообучения. Однако для повышения его эффективности возникает потребность в лично-ориентированном подходе к ученику. Создание технологий адаптивного обучения становится приоритетной задачей. Целью данной работы стала разработка математической модели автоматизированной системы обучения игре на фортепиано, позволяющей реализовать принципы адаптации учебного процесса.

**Методы.** В статье представлена математическая модель автоматизированной системы обучения игре на фортепиано, для этого рассмотрен один из подходов к моделированию образовательных процессов и систем – кибернетический подход. Использование такого подхода позволяет рассмотреть модель образовательной системы с точки зрения внутренних блоков и их функций, позволяет выявить наборы входных и выходных данных и внутренние взаимосвязи различных компонентов системы. В основу математической модели положены операции алгебры логики и теории множеств.

**Результаты.** В статье получена функциональная схема системы, которая демонстрирует последовательность выполняемых системой действий, а также поток различных множеств входных и выходных данных. Функционал блоков описан в терминологии операторов, которые определяют последовательность и необходимое количество вопросов для определения начальных знаний, умений, навыков обучаемого и его целей, подбирают наиболее оптимальный начальный план обучения, оценивают прогресс и корректируют начальный план обучения в зависимости от результатов обучаемого. Описание входных и выходных данных показывает, какой информацией должна оперировать система для ее корректной и эффективной работы. Еще одним значимым результатом работы стала полученная в результате исследований математическая модель системы, определяющая взаимосвязь входных и выходных данных.

**Заключение.** Кибернетический подход к моделированию образовательной деятельности позволяет структурировать отдельную область образовательной системы, упорядочить сложные логические связи в образовательной системе, определить последовательность и варианты работы системы. Модель будет положена в основу информационно-системы обучения игре на фортепиано.

**Ключевые слова:** математическая модель системы; функциональная схема; индивидуализация процесса обучения; автоматизированная система обучения; обучение игре на фортепиано; математическое моделирование.

© Остренко А.А., Рыжкова М.Н., 2023

**Конфликт интересов:** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Для цитирования:** Остренко А.А., Рыжкова М.Н. Математическая модель автоматизированной системы обучения игре на фортепиано // Известия Юго-Западного государственного университета. 2023; 27(2): 105-123. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-2-105-123>.

Поступила в редакцию 29.06.2023

Подписана в печать 14.07.2023

Опубликована 02.08.2023

## Mathematical Model of an Automated System for Learning to Play the Piano

Anna A. Ostrenko <sup>1</sup>, Mariya N. Ryzhkova <sup>1</sup> ✉

<sup>1</sup> Murom Institute (branch) Vladimir State University named after Alexander Grigoryevich and Nickolay Grigoryevich Stoletovs  
23 Orlovkaya str., Murom 602264, Russian Federation

✉ e-mail: [masmash@mail.ru](mailto:masmash@mail.ru)

### Abstract

**Purpose of research.** Nowadays, the automation of the distance learning process or self-study is relevant. However, to increase its effectiveness, there is a need for a personality-oriented approach to the student. The creation of adaptive learning technologies is becoming a priority. Development of a mathematical model of an automated system for learning to play the piano was the purpose of this work.

**Methods.** The article discusses one of the approaches to modeling educational processes and systems - the cybernetic approach. The use of this approach allows us to consider the model of the educational system from the point of view of internal blocks and their functions, it allows us to identify sets of input and output data and internal relationships of various components of the system. The mathematical model is based on the operations of the algebra of logic and set theory.

**Results.** Based on the cybernetic approach, the article provides a functional diagram of the system, which clearly demonstrates the sequence of actions performed, as well as the flow of various sets of input and output data. The functionality of the blocks is described in the terminology of operators, which determine the sequence and the required number of questionnaire questions to determine the initial knowledge, skills, and abilities of the trainee and his goals, select the most optimal initial training plan, assess progress and adjust the initial training plan depending on the results of the student. For each operator, sets of inputs and outputs are defined. The description of the data shows what information the system must operate in order for it to work correctly and efficiently. Another significant result of the work was the mathematical model of the system obtained as a result of research, which determines the relationship between input and output data.

**Conclusion.** The cybernetic approach to modeling educational activities, including in the system of additional education, allows you to structure complex logical connections in the educational system, to determine the sequence and options for the system. The model will form the basis of the information system for piano playing teaching.

**Keywords:** the system mathematical model; functional diagram; the learning process individualization; automated learning system; learning to play the piano; mathematical modeling.

**Conflict of interest.** *The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.*

**For citation:** Ostrenko A.A., Ryzhkova M.N. Mathematical Model of an Automated System for Learning to Play the Piano. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University.* 2023; 27(2): 105-123 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-2-105-123>.

Received 29.06.2023

Accepted 14.07.2023

Published 02.08.2023

\*\*\*

## Введение

В наши дни актуальным является автоматизация дистанционного процесса обучения или самообучения. Однако для повышения его эффективности возникает потребность в личностно-ориентированном подходе к ученику. Создание технологий адаптивного обучения становится приоритетной задачей [1]. В [2] рассматривается современное состояние адаптивного образования, его плюсы и минусы.

Наряду с обязательной образовательной программой, дистанционное обучение широко используется при дополнительном образовании, в частности информационные технологии активно внедряются в музыкальное образование. При этом адаптация образовательной программы под навыки, желания и способности учащегося – наиболее оптимальный вариант дополнительного образования.

Если рассматривать автоматизацию учебного процесса для освоения навыка игры на фортепиано, то видно, что она требует некоторых дополнительных условий для качественного функционирования.

Во-первых, визуализация является не просто вспомогательным, но одним

из обязательных условий для данного вида обучения. Лучше всего такой подход реализован с помощью пошаговой подсветки клавиш на экране или на самой клавиатуре (при наличии специальной техники), когда в зависимости от момента их нажатия они выделяются ярким цветом на фоне остальных.

Во-вторых, чтобы контролировать прохождение курса обучения необходимо отслеживать правильное нажатие клавиш во время игры. Эта функция может работать при наличии:

1) сенсорных датчиков экрана (если обучение происходит на виртуальной клавиатуре);

2) специальных аппаратных приспособлений для подключения клавиатуры к носителю обучающей программы (компьютеру, смартфону);

3) системы распознавания звука в программном обеспечении и микрофона (в частности, встроенный в смартфон или компьютер).

Для того, чтобы определить правильность исполнения мелодии распознаваемый звук преобразуют в набор его числовых характеристик и сравнивают с эталонным.

Для решения таких практических задач, как распознавание и преобразование звука в ноты используются мето-

ды автоматической транскрипции музыки (АТМ). Одним из распространенных способов кодирования музыкального фрагмента является его запись в виде MIDI-формата. Способы анализа и обработки звукового ряда рассмотрены в работах [3, 4, 5, 6].

Наиболее популярные сегодня автоматизированные системы обучения игре на фортепиано представлены в виде мобильных приложений «Пианино - Симулятор фортепиано», «Piano Infinity» и «Simple Piano», а также программных сервисов «Synthesia» и «KaraKEYoke» [7, 8]. Основным преимуществом всех перечисленных систем является наличие различных режимов обучения – от простого к сложному. Дифференциация процесса обучения позволяет доступно объяснить один и тот же учебный материал ученикам с различным уровнем подготовки [9]. Это предотвращает накопление пробелов знаний у «слабых» учеников и отсутствие интереса у «сильных». При этом, существующие и разрабатываемые системы дают дальнейшие рекомендации по проблемным темам и оценку уровня знаний по количеству правильных и ошибочных ответов. Однако стоит отметить, что не всегда большое количество неправильных ответов будет свидетельствовать о низком уровне знаний. Подобные результаты можно также наблюдать у человека с усталостью или рассеянностью. Рекомендации и составление графика занятий с учетом психофизиологических особенностей и возможностей обучае-

мого позволят повысить его продуктивность и работоспособность.

Методы организации адаптивного обучения позволят разработать автоматизированную систему, способную повысить эффективность самообразования при освоении навыков игры на фортепиано.

Целью данной работы стала разработка математической модели автоматизированной системы обучения игре на фортепиано. Математическая модель необходима для наглядного отображения функционирования системы, определения этапов работы системы и методов обработки данных в данной системе.

Для разработки математической модели необходимо выполнить следующие задачи:

1. Разработать функциональную схему системы.
2. Описать характеристики входных и выходных данных.
3. Разработать математическую модель, определяющую взаимосвязь входных и выходных данных.

## Материалы и методы

Современные подходы к моделированию учебного процесса делятся на 2 большие группы:

- педагогические и дидактические методы моделирования,
- математическое и системное моделирование.

Первые модели определяют педагогические подходы к образовательному процессу. В научных работах рассматри-

вают мотивационно-целевые, содержательно-когнитивные, организационно-деятельностные и результативно-рефлексивные составляющие модели образовательной системы [10, 11].

Вторые модели позволяют рассматривать функциональные закономерности в обучающих системах и уже могут быть положены в основу информационных систем обучения, такие модели отличаются разнообразием используемых математических методов. Так, например, с точки зрения информационных моделей и алгоритмов удобно представлять адаптивное обучение [12]. В работе [13] используются марковские цепи для оценки пользователями обучающего контента, а в работе [14] используется векторная модель обучения. В [15] предлагают кластеризацию учащихся по различным дидактическим группам, а в [16] используют имитационное моделирование. В работе

[17] используют инфологическое моделирование для распределения ролей субъектов системы и потоков данных между ними. В [18] авторы предлагают использовать онтологический подход при разработке базы знаний интеллектуальной системы поддержки обучения, а в работе [19] – схожий тезаурусный подход.

Анализ методов моделирования учебного процесса и подходов к обучению приводит к выводу, что работа автоматизированной системы обучения игре на фортепиано должна основываться на принципах индивидуализации учебного процесса на начальном этапе и регулярной корректировки плана обучения в зависимости от успеваемости обучающегося [20]. Для дальнейшей разработки и реализации данной системы была предложена следующая функциональная схема (рис. 1).

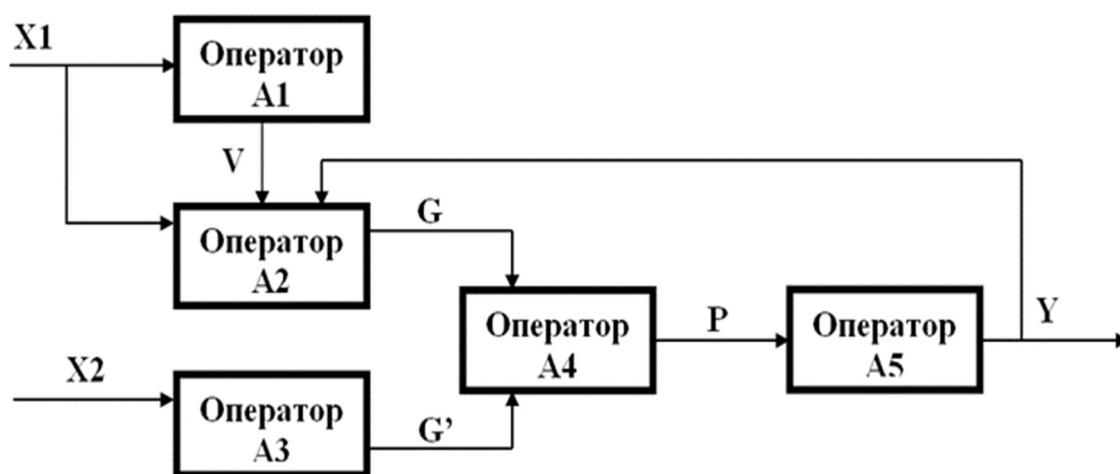


Рис. 1. Функциональная схема

Fig. 1. Functional diagram

За функционал системы отвечают 5 операторов:

1. Оператор  $A1$  – определяет последовательность и необходимое количество вопросов анкетирования, чтобы получить максимум информации за более короткий срок времени. Входные данные – множество  $X1$ ; выходные данные – множество  $V$ .

2. Оператор  $A2$  – исходя из анализа данных анкетирования подбирает наиболее оптимальный начальный план обучения. Входные данные – множества  $X1$  и  $V$ ; выходные данные – множество  $G_i$ .

3. Оператор  $A3$  – представляет собой систему распознавания звука и его дальнейшего преобразования в midi-формат, для получения информации об игре пользователя на фортепиано. Входные данные – множество  $X2$ ; выходные данные – множество  $G_i'$ .

4. Оператор  $A4$  – сравнивает реальное прохождение обучения с требуемым, оценивает прогресс. Входные данные – множества  $G_i$  и  $G_i'$ ; выходные данные – множество  $P$ .

5. Оператор  $A5$  – в зависимости от результатов прохождения обучения определяет коэффициенты корректировки начального плана обучения. Входные данные – множество  $P$ ; выходные данные – множество  $Y$ .

Для полноценной работы разрабатываемая система должна оперировать следующими наборами данных:

1. Множество  $V$  – вопросы анкетирования определенной последователь-

ности, для получения информации о возрасте, наличии и уровне навыка игры, типе темперамента и пожеланиях в обучении пользователя. Множество включает в себя:

$v_1$  – «Укажите Ваш возраст»;

$v_2$  – «Вам нужна теория?»;

$v_3$  – «У Вас есть навык игры?»;

$v_4$  – «У Вас высокий уровень навыка?»;

$v_5$  – «Вы по натуре живой человек?»;

$v_6$  – «Стараетесь ли Вы в трудных ситуациях предпринять что-то еще?»;

$v_7$  – «Любите ли Вы рассказывать истории друзьям?»;

$v_8$  – «Предпочитаете ли Вы работать в одиночестве?»;

$v_9$  – «Часто ли вы чувствуете себя усталым?»;

$v_{10}$  – «Сложно ли Вам сосредоточиться на чем-либо еще?»;

$v_{11}$  – «Часто ли Вы бываете погружены в свои мысли?»;

$v_{12}$  – «Легко ли Вы поддаетесь переменам настроения?».

2. Множество  $X1$  представляет собой ответы пользователя на вопросы анкетирования, включает в себя:

$x_1$  – наличие первоначального навыка;

$x_2$  – уровень навыка;

$x_3$  – необходимость теории;

$x_4$  – возраст;

$x_5$  – тип темперамента, зависит от величин  $x_{tr}$  и  $emo$ , где:

$xtr$  – экстраверсия;

$emo$  – эмоциональная стабильность.

3. Множество  $X2$  – набор звуковых характеристик мелодии, которую исполняет обучающийся.

4. Множество  $G_i$  – основные характеристики выбранного плана обучения, включают в себя пошаговое изучение мелодии и теоретических основ, длительность занятий, требуемые звуковые характеристики нот:

$g1$  – количество отдельно изучаемых отрезков мелодии;

$g2$  – длительность одного занятия;

$g3_i$  – эталонный (правильный) тон звука  $i$ -той ноты;

$g4_i$  – эталонная (правильная) длительность звука  $i$ -той ноты;

$g5_i$  – эталонная (правильная) длительность паузы после  $i$ -той ноты;

$i$  – номер ноты (от первой до последней ноты в отрезке);

$k$  – коэффициент скорости воспроизведения (в зависимости от требуемой скорости воспроизведения мелодии);

$n$  – порядковый номер предлагаемого к изучению отрезка мелодии ( $n_{\max}$  – общее количество отрезков мелодии);

$rov_n$  – планируемое количество повторов  $n$ -го отрезка мелодии.

5. Множество  $G'_i$  – набор характеристик реального исполнения изучаемой мелодии и прохождения занятий, включает в себя:

$g1'$  – получившееся количество отрезков мелодии;

$g2'$  – длительность проведенного занятия;

$g3'$  – исполненный тон звука  $i$ -той ноты;

$g4'$  – исполненная длительность звука  $i$ -той ноты;

$g5'$  – исполненная длительность паузы после  $i$ -той ноты;

$i'$  – номер исполненной ноты;

$k'$  – реальный коэффициент скорости воспроизведения;

$n'$  – порядковый номер изучаемого отрезка мелодии;

$rov'_n$  – выполненное количество повторов  $n$ -го отрезка мелодии;

$m'$  – количество нот в исполненном отрезке.

6. Множество  $P$  – набор сравнительных показателей реального и требуемого прохождения плана обучения, включает в себя количественные и качественные показатели отклонения реального исполнения от требуемого, совершенные ошибки, нехватка или избыток повторения и времени;

$p_1$  – количество неправильных нот;

$\delta_1$  – доля неправильных нот всем фрагменте мелодии;

$p_2$  – суммарная разность (по модулю) исполненной и эталонной длительности нот;

$\delta_2$  – доля отклонения длительности всех нот от эталонной;

$p_3$  – суммарная разность (по модулю) исполненной и эталонной длительности пауз;

$\partial_3$  – доля отклонения длительности пауз от эталонной;

$p_4$  – разность порядковых номеров изучаемого отрезка с планируемым;

$j$  – порядковый номер промежутка в 10 нот;

$V_j$  – количество ошибок в  $j$ -том промежутке;

$conc_j$  – концентрация ошибок в  $j$ -том промежутке;

$N$  – количество промежутков с высокой концентрацией (максимальной и отличающихся от нее на 10%);

$\partial_4$  – среднее арифметическое высоких концентраций ошибок;

$p_5$  – разность планируемого и реального количества повторов  $n$ -го отрезка мелодии;

$\partial_5$  – доля отклонения реального и планируемого количество повторов  $n$ -го отрезка мелодии;

$\partial_6$  – доля отклонения реального и планируемого времени занятия;

$\partial_7$  – доля отклонения реального и планируемого коэффициента скорости воспроизведения.

7. Множество  $Y$  представлено в виде коэффициентов корректировки плана обучения, в частности корректировки длительности занятий, скорости подачи информации, количества повторов и проверки пройденного материала:

$y1$  – коэффициент корректировки количества отрезков мелодии;

$y2$  – коэффициент корректировки длительности одного занятия;

$y3$  – коэффициент корректировки скорости воспроизведения;

$y4_n$  – коэффициент корректировки количества повторов  $n$ -го отрезка.

Рассмотрим, как работают отдельные операторы.

Оператор  $A1$  определяет последовательность и необходимое количество вопросов анкетирования, чтобы получить максимум информации за более короткий срок времени. Входные данные – множество  $X5$ ; выходные данные – множество  $V$ . Работа оператора  $A1$ :

1) при ответе на вопрос  $v_1$

$$x_4 = \begin{cases} 10000, & \text{то } V = \{v_i, i \in N, 2 \leq i \leq 12, i \neq 4\} \\ 01000, & \text{то } V = \{v_i, i \in N, 2 \leq i \leq 12\} \\ 00100, & \text{то } V = \{v_i, i \in N, 2 \leq i \leq 12\} \\ 00010, & \text{то } V = \{v_i, i \in N, 2 \leq i \leq 12\} \\ 00001, & \text{то } V = \{v_i, i \in N, 2 \leq i \leq 4\}; \end{cases}$$

2) при ответе на вопрос  $v_2$

$$x_3 = \begin{cases} 1, & \text{то } V = \{v_i, i \in N, 3 \leq i \leq 12, i \neq 4\} \\ 0, & \text{то } V = \{v_i, i \in N, 3 \leq i \leq 12\}; \end{cases}$$

3) при ответе на вопрос  $v_3$

$$x_1 = \begin{cases} 1, & \text{то } V = \{v_i, i \in N, 4 \leq i \leq 12\} \\ 0, & \text{то } V = \{v_i, i \in N, 5 \leq i \leq 12\}; \end{cases}$$

4) при ответе на вопрос  $v_4$

$$x_2 = \begin{cases} 1, & \text{то } V = \{v_i, i \in N, 5 \leq i \leq 12\} \\ 0, & \text{то } V = \{v_i, i \in N, 5 \leq i \leq 12\}; \end{cases}$$

5) при ответе на вопрос  $v_5$

$$xtr_1 = \begin{cases} 1, & \text{то } V = \{v_i, i \in N, 6 \leq i \leq 12\} \\ 0, & \text{то } V = \{v_i, i \in N, 6 \leq i \leq 12\}; \end{cases}$$

6) при ответе на вопрос  $v_6$

$$xtr_2 = \begin{cases} 0, & \text{то } V = \{v_i, i \in N, 9 \leq i \leq 12\} \\ 1, & \text{то } V = \{v_i, i \in N, 7 \leq i \leq 12\} \\ 2, & \text{то } V = \{v_i, i \in N, 7 \leq i \leq 12\}; \end{cases}$$



7) при ответе на вопрос  $v_7$ 

$$xtr_3 = \begin{cases} 0, \text{ то } V = \{v_i, i \in N, 9 \leq i \leq 12\} \\ 1, \text{ то } V = \{v_i, i \in N, 9 \leq i \leq 12\} \\ 2, \text{ то } V = \{v_i, i \in N, 8 \leq i \leq 12\} \\ 3, \text{ то } V = \emptyset; \end{cases}$$

8) при ответе на вопрос  $v_8$ 

$$xtr_4 = \begin{cases} 2, \text{ то } V = \{v_i, i \in N, 9 \leq i \leq 12\} \\ 3, \text{ то } V = \emptyset; \end{cases}$$

9) при ответе на вопрос  $v_9$ 

$$emo_1 = \begin{cases} 0, \text{ то } V = \{v_i, i \in N, 10 \leq i \leq 12\} \\ 1, \text{ то } V = \{v_i, i \in N, 10 \leq i \leq 12\}; \end{cases}$$

10) при ответе на вопрос  $v_{10}$ 

$$emo_2 = \begin{cases} 0, \text{ то } V = \emptyset \\ 1, \text{ то } V = \{v_i, i \in N, 11 \leq i \leq 12\} \\ 2, \text{ то } V = \{v_i, i \in N, 11 \leq i \leq 12\}; \end{cases}$$

11) при ответе на вопрос  $v_{11}$ 

$$emo_3 = \begin{cases} 1, \text{ то } V = \emptyset \\ 2, \text{ то } V = \{v_i, i \in N, i = 12\} \\ 3, \text{ то } V = \emptyset; \end{cases}$$

12) при ответе на вопрос  $v_{12}$ 

$$emo_4 = \begin{cases} 2, \text{ то } V = \emptyset \\ 3, \text{ то } V = \emptyset. \end{cases}$$

Работа оператора  $A_2$ :1) при ответе на вопрос  $v_1$ 

$$x_4 = \begin{cases} 10000, \text{ то } G = \{G_i, i \in N, 3 \leq i \leq 10\} \\ 01000, \text{ то } G = \{G_i, i \in N, 1 \leq i \leq 10\} \\ 00100, \text{ то } G = \{G_i, i \in N, 1 \leq i \leq 10\} \\ 00010, \text{ то } G = \{G_i, i \in N, 1 \leq i \leq 10, \\ i \neq 5, i \neq 7\} \\ 00001, \text{ то } G = \{G_{2i}, i \in N, 1 \leq i \leq 5\}; \end{cases}$$

2) при ответе на вопрос  $v_2$ 

$$x_3 = \begin{cases} 1, \text{ то } G = \{G_i, i \in N, 3 \leq i \leq 10\} \\ 0, \text{ то } G = \{G_i, i \in N, 1 \leq i \leq 10\}; \end{cases}$$

3) при ответе на вопрос  $v_3$ 

$$x_1 = \begin{cases} 1, \text{ то } G = \{G_i, i \in N, 1 \leq i \leq 6\} \\ 0, \text{ то } G = \{G_i, i \in N, 7 \leq i \leq 10\}; \end{cases}$$

4) при ответе на вопрос  $v_4$ 

$$x_2 = \begin{cases} 1, \text{ то } G = \{G_i, i \in N, 1 \leq i \leq 2\} \\ 0, \text{ то } G = \{G_i, i \in N, 3 \leq i \leq 6\}; \end{cases}$$

5) при ответе на вопрос  $v_5$ 

$$xtr_1 = \begin{cases} 1, \text{ то } xtr = 0 \\ 0, \text{ то } xtr = 0; \end{cases}$$

6) при ответе на вопрос  $v_6$ 

$$xtr_2 = \begin{cases} 0, \text{ то } xtr = 0 \\ 1, \text{ то } xtr = 0 \\ 2, \text{ то } xtr = 0; \end{cases}$$

7) при ответе на вопрос  $v_7$ 

$$xtr_3 = \begin{cases} 0, \text{ то } xtr = 0 \\ 1, \text{ то } xtr = 0 \\ 2, \text{ то } xtr = 0 \\ 3, \text{ то } xtr = 1; \end{cases}$$

8) при ответе на вопрос  $v_8$ 

$$xtr_4 = \begin{cases} 2, \text{ то } xtr = 0 \\ 3, \text{ то } xtr = 1; \end{cases}$$

9) при ответе на вопрос  $v_9$ 

$$emo_1 = \begin{cases} 0, \text{ то } emo = 1 \\ 1, \text{ то } emo = 1; \end{cases}$$

10) при ответе на вопрос  $v_{10}$ 

$$emo_2 = \begin{cases} 0, \text{ то } emo = 1 \\ 1, \text{ то } emo = 1 \\ 2, \text{ то } emo = 1; \end{cases}$$

11) при ответе на вопрос  $v_{11}$ 

$$emo_3 = \begin{cases} 0, \text{ то } emo = 1 \\ 1, \text{ то } emo = 1 \\ 2, \text{ то } emo = 1 \\ 3, \text{ то } emo = 0; \end{cases}$$

12) при ответе на вопрос  $v_{12}$

$$emo_4 = \begin{cases} 2, \text{ то } emo = 1 \\ 3, \text{ то } emo = 0; \end{cases}$$

13) при определении параметра  $xtr$

$$xtr = \begin{cases} 0, \text{ то } x_5 = \{xtr; emo\} \\ 1, \text{ то } x_5 = \{1; 1\}; \end{cases}$$

14) при определении параметра  $x_5$

$$x_5 = \begin{cases} \{1; 1\}, \text{ то } G = \{G_i, i \in N, 1 \leq i \leq 10\} \\ \{0; 0\}, \text{ то } G = \{G_i, i \in N, 1 \leq i \leq 10\} \\ \{0; 1\}, \text{ то } G = \{G_{2i}, i \in N, 1 \leq i \leq 5\}; \end{cases}$$

15) определение группы:

$$G = G(x_1) \cap G(x_2) \cap G(x_3) \cap G(x_4) \cap G(x_5);$$

16) корректировка плана:

$$G = \{g1 \cdot y_1; g2 \cdot y_2; g3_i; g4_i; g5_i; i; k \cdot y_3; n; pov_n \cdot y_4\}.$$

Работа оператора  $A3$  осуществляется на основе уже существующего алгоритма, собственная разработка данного оператора не требуется.

Работа оператора  $A4$ :

1) определение количества неправильно сыгранных нот:

$$p_1 = \begin{cases} |g3_i - g3'_i| = 0, \text{ то } p_1 = p_1 \\ |g3_i - g3'_i| \neq 0, \text{ то } p_1 = p_1 + 1; \end{cases}$$

2) определение доли ошибочных нот во всем фрагменте мелодии

$$\partial_1 = \frac{p_1}{i_{\max}};$$

3) определение суммарного отклонения исполненной и эталонной длительности нот:

$$p_2 = \sum |g4_i - g4'_i|;$$

4) определение доли отклонения длительности всех нот фрагмента от эталонной:

$$\partial_2 = \frac{p_2}{\sum g4_i};$$

5) определение суммарного отклонения исполненной и эталонной длительности пауз:

$$p_3 = \sum |g5_i - g5'_i|;$$

6) определение доли отклонения исполненной длительности пауз от эталонной:

$$\partial_3 = \frac{p_3}{\sum g5_i};$$

7) определение последнего порядкового номера промежутка в 10 нот (или меньше) изучаемого фрагмента мелодии:

$$j_{\max} = \left\lfloor \frac{m'}{10} \right\rfloor + 1;$$

8) определение количества ошибок в  $j$ -том промежутке:

$$V_j = \sum |g3_{i+(j-1) \cdot 10} - g3'_{i+(j-1) \cdot 10}| + \begin{cases} |g4_{i+(j-1) \cdot 10} - g4'_{i+(j-1) \cdot 10}| = 0, \text{ то } V_j = V_j \\ |g4_{i+(j-1) \cdot 10} - g4'_{i+(j-1) \cdot 10}| \neq 0, \text{ то } V_j = V_j + 1 \\ |g5_{i+(j-1) \cdot 10} - g5'_{i+(j-1) \cdot 10}| = 0, \text{ то } V_j = V_j \\ |g5_{i+(j-1) \cdot 10} - g5'_{i+(j-1) \cdot 10}| \neq 0, \text{ то } V_j = V_j + 1; \end{cases}$$

9) определение концентрации ошибок в  $j$ -том промежутке:

$$konc_j = \begin{cases} j < j_{\max}, \text{ то } konc_j = \frac{V_j}{30} \\ j = j_{\max}, \text{ то } konc_j = \frac{V_j}{\left\lfloor \frac{m'}{10} \right\rfloor \cdot 3}; \end{cases}$$

10) определение количества промежуточных с высокой концентрацией ошибок:

$$N = \begin{cases} \text{konc}_j = \text{konc}_{j_{\max}}, \text{ то } N = 1 \\ \frac{\text{konc}_j}{\text{konc}_{j_{\max}}} \geq 0.9, \text{ то } N = N + 1 \\ \frac{\text{konc}_j}{\text{konc}_{j_{\max}}} < 0.9, \text{ то } N = N; \end{cases}$$

11) определение среднего арифметического высоких концентраций ошибок:

$$\partial_4 = \frac{\sum \text{konc}_j \left| \frac{\text{konc}_j}{\text{konc}_{j_{\max}}} \geq 0.9 \right.}{N};$$

12) определение разности порядковых номеров изучаемого и планируемого отрезков:

$$p_4 = |n' - n|;$$

13) определение разности планируемого и реального количества повторов отрезка мелодии:

$$p_5 = |pov'_n - pov_n|;$$

14) определение доли отклонения реального и планируемого количества повторов изучаемого отрезка мелодии:

$$\partial_5 = \frac{g1'}{g1};$$

15) определение доли отклонения реального и планируемого времени занятий:

$$\partial_6 = \frac{g2'}{g2};$$

16) определение доли отклонения реального и планируемого коэффициента скорости воспроизведения

$$\partial_7 = \frac{k'}{k}.$$

Работа оператора A5:

1) определение коэффициента корректировки количества отрезков мелодии:

$$y1 = \begin{cases} 1 \\ \partial_1 \geq 0.85, \text{ то } y1 = 1.5 \\ \partial_2 \geq 0.85, \text{ то } y1 = 1.5 \\ \partial_3 \geq 0.9, \text{ то } y1 = 1.5 \\ \partial_4 \geq 0.75, \text{ то } y1 = 2 \\ 0.35 \leq \partial_4 < 0.75, \text{ то } y1 = 1.5 \\ \partial_5 > 1, \text{ то } y1 = 1.5 \\ \partial_5 < 1, \text{ то } y1 = 0.75; \end{cases}$$

2) определение коэффициента корректировки длительности одного занятия:

$$y2 = \begin{cases} 1 \\ \partial_4 \geq 0.9, \text{ то } y2 = 0.67 \\ \partial_5 \geq 6, \text{ то } y2 = 0 \\ 3 \leq \partial_5 \leq 5, \text{ то } y2 = 0.67 \\ \partial_6 \leq 0.7, \text{ то } y2 = 0.67 \\ \partial_6 \geq 1.25, \text{ то } y2 = 1.5 \\ p_5 \geq 10, \text{ то } y2 = 1.5 \\ \partial_2 \geq 1, \text{ то } y2 = 0 \\ \partial_3 \geq 1, \text{ то } y2 = 0; \end{cases}$$

3) определение коэффициента корректировки скорости воспроизведения:

$$y3 = \begin{cases} 1 \\ p_2 = 0, \text{ то } y3 = 2 \\ p_3 = 0, \text{ то } y3 = 2 \\ \partial_3 \leq 0.9, \text{ то } y3 = 0.5 \\ 0.3 \leq \partial_3 < 0.9, \text{ то } y3 = 0.67 \\ \partial_7 \geq 1, \text{ то } y3 = 1.5 \\ \partial_7 < 0.5, \text{ то } y3 = 0.67; \end{cases}$$

4) коэффициент корректировки количества повторов  $n$ -го отрезка:

$$y4_n = \begin{cases} 1 \\ \partial_1 \geq 0.5, \text{ то } y4_n = 2 \\ \partial_2 \leq 0.2, \text{ то } y4_n = 0.67 \\ \partial_3 \leq 0.2, \text{ то } y4_n = 0.67 \\ 0.25 \leq \partial_4 \leq 0.5, \text{ то } y4_n = 1.5 \\ p_1 = 0, \text{ то } y4_n = 0.5. \end{cases}$$

## Результаты и их обсуждение

На основании разработанной модели могут быть предложены следующие алгоритмы работы адаптивной системы обучения:

- алгоритм построения начальной точки обучающей траектории,
- алгоритм корректировки плана обучения.

Алгоритм построения начального плана обучения разрабатывается таким образом, чтобы определить наиболее подходящую группу учеников с одинаковыми предпочтениями, наличием и уровнем навыка, по возрастным и психологическим признакам. Принцип работы алгоритма построения начальной точки обучающей траектории заключается в следующем:

1) предполагаем изначально, что пользователю подходит любая из всех учебных групп;

2) по мере получения необходимой информации о пользователе отсеиваем те группы, которые ему однозначно не подходят.

Алгоритм корректировки начального плана обучения отвечает за выявление психофизиологических особенностей отдельного обучающегося и адаптацией под них плана обучения. Принцип работы алгоритма корректировки индивидуального плана обучения заключается в изменении параметров плана обучения в зависимости от результатов прохождения учебного плана.

Тестирование модели проводилось для группы пользователей. Для примера рассмотрим троих пользователей:

– пользователь 1 – возраст составляет 21 год; желает изучить мелодию, не вникая в теоретическую базу; никогда ранее не учился играть, по результатам теста на экстраверсию был определен как экстраверт. Результат анкетирования определил его в 7 учебную группу. План обучения этой группы включает в себя разбивку мелодии на 20 отрезков, количество повторений для каждого – 5 раз, воспроизведение мелодии замедлено в 3 раза, длительность одного занятия составляет 30 минут;

– пользователь 2 – возраст 27 лет; хочет подтянуть навык чтения по нотам и закрепить на практике; ранее занимался на фортепиано. Система анкетирования определила его в группу 6. План обучения этой группы включает в себя разбивку мелодии на 15 отрезков, количество повторений для каждого – 8 раз, воспроизведение мелодии замедлено в 4 раза, длительность одного занятия составляет 45 минут;

– пользователь 3 – возраст 15 лет, нужно изучить мелодию, недавно окончил музыкальную школу и считает свой навык достаточно высоким; тип темперамента – флегматик. Тест определил группу 2. План обучения этой группы включает в себя разбивку мелодии на 45 отрезков, количество повторений для каждого – 5 раз, воспроизведение мелодии замедлено в 2 раза, длительность одного занятия составляет 45 минут.

Данные о начальных планах обучения пользователей сведены в табл. 1.

**Таблица 1.** Характеристика начального плана обучения**Table 1.** Characteristics of the initial training plan

Пользователи / Users	Группа / Group	Количество отрезков / Number of segments	Количество повторений / Number of repetitions	Коэффициент замедления / Decel- eration factor	Длительность занятия, мин / Duration of the lesson, min
Пользователь 1	7	20	5	3	30
Пользователь 2	6	15	8	4	45
Пользователь 3	2	45	5	2	45

Корректировка начального плана обучения выполняется после каждого повторения изучаемого отрезка мелодии. Для более наглядного сравнения результатов в данной работе будем рассматривать корректировку после 1, 3 и 5 проигрыша изучаемого отрезка.

Анализ данных о прохождении учебного плана пользователем 1 показал, что длительность одного занятия в 30 ми-

нут необходимо сократить до 20 минут, так как после этого времени была выявлена высокая концентрация ошибок в одних и тех же местах. Такая корректировка позволила на четвертом повторении отрезка мелодии ускорить темп воспроизведения до оригинала, без отрицательных последствий для обучаемости пользователя. Данные корректировок приведены в табл. 2.

**Таблица 2.** Корректировка плана обучения для первого пользователя**Table 2.** Adjustment of the training plan for the first user

№ корректировки / Adjustment No.	Количество отрезков / Number of segments	Количество повторений / Number of repetitions	Коэффициент замедления / Deceleration factor	Длительность занятия, мин / Duration of the lesson, min
Начало	20	5	3	30
Корректировка 1	20	5	3	30
Корректировка 3	20	5	2	20
Корректировка 5	20	5	1	20

Из-за большого процента ошибочно исполненных нот для пользователя 2 было решено увеличить количество отрезков мелодии, за счет уменьшения их длительности. При такой корректировке

значительно уменьшилась доля ошибок, и доля отклонения длительности нот и пауз. Это позволило сократить количество повторений отрезка до 5 раз. Данные корректировок приведены в табл. 3.

**Таблица 3.** Корректировка плана обучения для второго пользователя**Table 3.** Adjustment of the training plan for the second user

№ корректировки / Adjustment No.	Количество отрезков / Number of segments	Количество повторений / Number of repetitions	Коэффициент замедления / Deceleration fac- tor	Длительность занятия, мин / Duration of the lesson, min
Начало	15	8	4	45
Корректировка 1	25	8	4	45
Корректировка 3	25	5	2	45
Корректировка 5	25	5	1	45

Пользователь 3 при прохождении обучения показал отклонение реальной скорости воспроизведения от требуемой: играл медленнее, из-за чего был высокий процент отклонения длительности пауз. Это стало основанием для

замедления скорости воспроизведения тем самым выровняли ритм, и уже к 5 повтору отрезка получилось приблизить значение скорости к оригиналу. Данные корректировок приведены в табл. 4.

**Таблица 4.** Корректировка плана обучения для третьего пользователя**Table 4.** Adjustment of the training plan for the third user

№ корректировки / Adjustment No.	Количество отрезков / Number of segments	Количество повторений / Number of repetitions	Коэффициент замедления / Deceleration fac- tor	Длительность занятия, мин / Duration of the lesson, min
Начало	45	5	2	45
Корректировка 1	45	5	3	45
Корректировка 3	45	5	2	45
Корректировка 5	45	5	1,3	45

## Выводы

Функциональная схема автоматизированной системы обучения игре на фортепиано наглядно демонстрирует последовательность выполняемых действий, а также поток различных множеств входных и выходных данных.

Описание данных показывает, какой информацией должна оперировать система для ее корректной и эффективной работы.

В ходе математического моделирования системы были определены взаимосвязи входных и выходных данных для каждой функции системы.

Таким образом была разработана математическая модель автоматизированной системы обучения игре на фортепиано для ее дальнейшей программной реализации.

Математическую модель можно положить в основу реальной автоматизированной системы обучения игре на фортепиано.

### Список литературы

1. Зайдуллина С.Г., Сафронов А.М. Роль современных систем адаптивного обучения в образовании // Преподавание информационных технологий в Российской Федерации. 2018; 227-228.
2. Дьячков Д.Б., Дьячкова Е.В. Обзор и анализ технологий для адаптивного обучения // E-Scio. 2022; №12 (75). URL: <http://e-scio.ru/wp-content/uploads/2022/12/Дьячков-Д.-Б.-Дьячкова-Е.-В.-Голубничий-А.-А.pdf>.
3. Андрадэ А.И., Насуро Е.В. Средство музыкальной транскрипции при помощи методов машинного обучения // BIG DATA and Advanced Analytics. 2019; №5: 386-390.
4. Корухова Ю.С., Мытрова М.В. Поиск нот в электронных библиотеках по фрагменту мелодии // Биомашсистемы. 2018; №3: 101-108.
5. Связова Е.Р. Проблема автоматической музыкальной транскрипции // Молодежный вестник уфимского государственного авиационного технического университета. 2019; №1: 159-162.
6. Recurrent Neural Network for MIDI Music Emotion Classification / W. Zhao, Y. Zhou, Y. Tie, Y. Zhao // 2018 IEEE 3rd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC), Chongqing, China. 2018. 2596-2600. doi: 10.1109/IAEAC.2018.8577272.
7. Остренко А.А., Рыжкова М.Н. Обзор и анализ технологий построения компьютерных систем обучения игре на фортепиано // Алгоритмы, методы и системы обработки данных. 2020; №1: 21-32.
8. Остренко А.А., Рыжкова М.Н. Обзор и анализ автоматизированных систем обучения игре на фортепиано // Наука и образование в развитии промышленной, социальной и экономической сфер регионов России. XII Всероссийские научные Зворыкинские чтения. Муром, 2020: 388.
9. Зверева Н.А. Разноуровневое и дифференцированное обучение как фактор повышения эффективности образовательного процесса в СПО // Молодой ученый. VIII Международная научная конференция «Педагогическое мастерство». Казань, 2016; 35-37.
10. Муранова Н.П. Моделирование физико-математической подготовки старшеклассников к обучению в техническом университете как дидактической системы // Известия ВГПУ. 2015; №1 (96): 56-63.

11. Ванягина М.Р. Комплексная модель системы иноязычного обучения в высшей военной школе // Вестник ТГУ. 2023; №1: 122-133.
12. Кунцевич О.Ю. Моделирование процесса обучения в контексте адаптивных образовательных технологий (на примере дисциплины «Базы данных») // ДМ. 2022; №55: 76-80.
13. Гончаров Д.И., Геращенко Т.М. Алгоритм построения рекомендаций в электронных образовательных средах на основе стохастических моделей Маркова // Современные технологии управления. 2022; №1 (97). URL: <https://sovman.ru/article/9713/>
14. Августова Ю.В. Векторная модель практико-ориентированного обучения в подготовке будущих юристов в системе СПО // Общество: социология, психология, педагогика. 2022; №12 (104): 342-348.
15. Домужнева К.Е. Моделирование подходов к обучению информатике студентов системы среднего профессионального образования путем их кластеризации на дидактические группы // Вестник КГПУ им. В.П. Астафьева. 2022; №2 (60): 190-199.
16. Надеждин Е. Н., Федотенко И. Л., Смирнова Е. Е. Методология имитационного моделирования педагогических систем // Чебышевский сборник. 2022; №5 (86): 291-304.
17. Шапорева А.В., Кухаренко Е.В., Григоренко О.В. Применение инфологического моделирования при разработке автоматизированной системы оценки качества обеспечения и организации учебного процесса при дистанционной технологии обучения // Евразийский Союз Ученых. 2019; №3-3 (60): 63-68.
18. Курзаева Л.В., Чусавитина Г.Н., Мусийчук М.В. Разработка базы знаний интеллектуальной системы поддержки обучения ИТ-специалистов с использованием онтологического моделирования // Мир науки. Педагогика и психология. 2017; №6. URL: <https://mir-nauki.com/PDF/99PDMN617.pdf>.
19. Тулохонова И.С. Моделирование системы обучения на основе тезаурусного подхода // Вестник евразийской науки. 2017; №4 (41). URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/86TVN417.pdf>.
20. Остренко А.А., Рыжкова М.Н. Алгоритм построения индивидуальной траектории обучения // Научный потенциал молодежи – будущее России. XII Всероссийские научные Зворыкинские чтения. Муром, 2020.

## References

1. Zaidullina S.G., Safronov A.M. Rol' sovremennykh sistem adaptivnogo obucheniya v obrazovanii [The role of modern systems of adaptive learning in education]. Prepodavanie informatsionnykh tekhnologii v Rossiiskoi Federatsii [Teaching information technologies in the Russian Federation] 2018; 227-228.



2. D'yachkov D.B., D'yachkova E.V. Obzor i analiz tekhnologii dlya adaptivnogo obucheniya [Overview and analysis of technologies for adaptive learning]. *E-Scio*. 2022; no.12 (75). Available at: <http://e-scio.ru/wp-content/uploads/2022/12/D'yachkov-D.-B.-D'yachkova-E.-V.-Golubnichii-A.-A.pdf>.
3. Andrade A.I., Nasuro E.V. Sredstvo muzykal'noi transkriptsii pri pomoshchi metodov mashinnogo obucheniya [Means of musical transcription by means of machine training methods]. *BIG DATA and Advanced Analytics*. 2019; №5: 386-390.
4. Korukhova Yu.S., Mytrova M.V. Poisk not v elektronnykh bibliotekakh po fragmentu melodii [Search for notes in electronic libraries by melody fragment]. *Biomashsistemy = Biomachsistems*. 2018; no.3: 101-108.
5. Sviyazova E.R. Problema avtomaticheskoi muzykal'noi transkriptsii [Musical transcription using neural network technology]. *Molodezhnyi vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta = Molodezhny Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University)*. 2019; no.1: 159-162.
6. Zhao W., Zhou Y., Tie Y. and Zhao Y. Recurrent Neural Network for MIDI Music Emotion Classification, 2018 *IEEE 3rd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC)*, Chongqing, China, 2018; 2596-2600. doi: 10.1109/IAEAC.2018.8577272.
7. Ostrenko A.A., Ryzhkova M.N. Obzor i analiz tekhnologii postroeniya komp'yuternykh sistem obucheniya igre na fortepiano. [Review and analysis of technologies for building computer systems for teaching piano playing]. *Algoritmy, metody i sistemy obrabotki dannykh = Algorithms, Methods and Data Processing Systems*. 2020; no.1: 21-32.
8. Ostrenko A.A., Ryzhkova M.N. [Review and analysis of automated systems for learning to play the piano]. *Nauka i obrazovanie v razvitii promyshlennoi, sotsial'noi i ekonomicheskoi sfer regionov Rossii. XII Vserossiiskie nauchnye Zvorykinskie chteniya*. [Science and education in the development of industrial, social and economic spheres of Russian regions. XII All-Russian Scientific Zworykin Readings]. Murom, 2020: 388 (In Russ.).
9. Zvereva N.A. [Multi-level and differentiated learning as a factor in improving the efficiency of the educational process in secondary vocational education]. *Molodoi uchenyi. VIII Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya «Pedagogicheskoe masterstvo»*. [Young scientist. VIII International Scientific Conference "Pedagogical Excellence"]. Kazan', 2016; 35-37 (In Russ.).
10. Muranova N.P. Modelirovanie fiziko-matematicheskoi podgotovki starsheklassnikov k obucheniyu v tekhnicheskom universitete kak didakticheskoi sistemy [Modeling of physical and mathematical training of senior school pupils for studying at a technical higher school as a didactic system]. *Izvestiya VGPU = Izvestia of the Volgograd State Pedagogical University*. 2015; no.1 (96): 56-63.

11. Vanyagina M.R. Kompleksnaya model' sistemy inoyazychnogo obucheniya v vysshei voennoi shkole. [Comprehensive model of foreign-language teaching system in higher military school]. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya: Gumanitarnye nauki = Tambov University Review. Series: Humanities*. 2023; no.1: 122-133 (In Russ.).

12. Kuntsevich O.Yu. Modelirovanie protsessa obucheniya v kontekste adaptivnykh obrazovatel'nykh tekhnologii (na primere distsipliny «Bazy dannykh») [Modeling the learning process of adaptive educational technologies (on the example for discipline «Databases»)]. *DM = Didactics of mathematics: Problems and Investigations*. 2022; no.55: 76-80.

13. Goncharov D.I., Gerashchenkova T.M. Modelirovanie protsessa obucheniya v kontekste adaptivnykh obrazovatel'nykh tekhnologii (na primere distsipliny «Bazy dannykh») [Algorithm for making recommendations in electronic educational environments based on stochastic Markov models]. *Sovremennye tekhnologii upravleniya = Modern Management Technology*. 2022; no.1 (97). Available at: <https://sovman.ru/article/9713/> (In Russ.)

14. Avgustova Yu.V. Vektornaya model' praktiko-orientirovannogo obucheniya v podgotovke budushchikh yuristov v sisteme SPO [Vector Model of Practice-Oriented Learning in the Training of Future Lawyers in the System of Secondary Vocational Education]. *Obshchestvo: sotsiologiya, psikhologiya, pedagogika = Society: Sociology, Psychology, Pedagogics*. 2022; no.12 (104): 342-348 (In Russ.).

15. Domuzhneva K.E. Modelirovanie podkhodov k obucheniyu informatike studentov sistemy srednego professional'nogo obrazovaniya putem ikh klasterizatsii na didakticheskie gruppy [Modeling of approaches to teaching computer science for vocational students by clustering them into didactic groups]. *Vestnik KGPU im. V.P. Astafyeva = Bulletin of the KSPU named after V.P. Astafyev*. 2022; no.2 (60): 190-199.

16. Nadezhdin E. N., Fedotenko I. L., Smirnova E. E. Metodologiya imitatsionnogo modelirovaniya pedagogicheskikh sistem [Methodology of simulation modeling of pedagogical systems]. *Chebyshevskii sbornik*. 2022; №5 (86): 291-304.

17. Shaporeva A.V., Kukhareno E.V., Grigorenko O.V. Primenenie infologicheskogo modelirovaniya pri razrabotke avtomatizirovannoi sistemy otsenki kachestva obespecheniya i organizatsii uchebnogo protsessa pri distantsionnoi tekhnologii obucheniya [Application of infological modeling in the development of the automated system of assessment of the quality of security and organization of the educational process in distance technology of training]. *Evraziiskii Soyuz Uchenykh = Eurasian Union of Scientists*. 2019; no.3-3 (60): 63-68.

18. Kurzaeva L.V., Chusavitina G.N., Musiichuk M.V. Razrabotka bazy znaniy intellektual'noi sistemy podderzhki obucheniya IT-spetsialistov s ispol'zovaniem ontologicheskogo modelirovaniya [The development of a knowledge base of intellectual system of support of training of it-specialists with the use of ontological modeling]. *Mir nauki. Pedagogika i psikhologiya = World of Science. Pedagogy and Psychology*. 2017; no.6. Available at: <https://mir-nauki.com/PDF/99PDMN617.pdf>.

19. Tulokhonova I.S. Modelirovanie sistemy obucheniya na osnove tezaurusnogo podkhoda [Simulation learning system on the basis of thesaurus approach]. *Vestnik evraziiskoi nauki = The Eurasian Scientific Journal*. 2017; no.4 (41). Available at: <https://naukovedenie.ru/PDF/86TVN417.pdf>. (In Russ.)

20. Ostrenko A.A., Ryzhkova M.N. [Algorithm for constructing an individual learning path]. *Nauchnyi potentsial molodezhi – budushchee Rossii. XII Vserossiiskie nauchnye Zvorykinskie chteniya*. [Scientific potential of youth - the future of Russia. XII All-Russian Scientific Zworykin Readings]. Murom, 2020 (In Russ.).

---

### Информация об авторах / Information about the Authors

**Остренко Анна Александровна**, магистрант кафедры физики и прикладной математики, Муромский институт (филиал) Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, г. Муром, Российская Федерация, e-mail: [masmash@mail.ru](mailto:masmash@mail.ru)

**Anna A. Ostrenko**, Master Student, Murom Institute (branch) of Vladimir State University named after Alexander Grigoryevich and Nickolay Grigoryevich Stoletovs, Murom, Russian Federation, e-mail: [masmash@mail.ru](mailto:masmash@mail.ru)

**Рыжкова Мария Николаевна**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры физики и прикладной математики, Муромский институт (филиал) Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, г. Муром, Российская Федерация, e-mail: [masmash@mail.ru](mailto:masmash@mail.ru)

**Mariya N. Ryzhkova**, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of Physics and Applied Mathematics Department, Murom Institute (branch) of Vladimir State University named after Alexander Grigoryevich and Nickolay Grigoryevich Stoletovs, Murom, Russian Federation, e-mail: [masmash@mail.ru](mailto:masmash@mail.ru)