

Автоматизированный контроль навыков решения оптимизационных задач с применением программного тренажера

И.С. Полевищikov^{1,2}, Л.Р. Таурова¹

¹Российский биотехнологический университет

²Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Аннотация: Исследование посвящено развитию средств электронного и дистанционного обучения при освоении специалистами в области разработки автоматизированных систем навыков применения математических методов. Разработана и схематично представлена концепция (структура) автоматизированной информационной системы (АИС) управления жизненным циклом упражнений по изучению методов оптимизации. Важным элементом поддержки принятия решений в АИС являются программные тренажеры (тренажерно-обучающие компоненты), осуществляющие функцию генерации вариантов упражнений и их автоматической проверки на основе свойств математических моделей задач оптимизации. Разработаны алгоритмическое и прототип программного обеспечения тренажерной подсистемы для контроля навыков решения задач оптимизации. Продемонстрированы вариации интерфейсов построения обучаемым математической модели для задачи оптимизации при выполнении упражнения в АИС. Построение модели в интерфейсе, и соответственно, сложность выполнения упражнения, зависит от числа допустимых для изменения студентом параметров модели. Тренажер обеспечивает интегральное оценивание действий обучаемого при выполнении задания. Внедрение тренажера в цифровую образовательную среду вуза позволит автоматизировать и упростить проведение мероприятий текущего и промежуточного контроля знаний и навыков по изучаемым дисциплинам.

Ключевые слова: задачи оптимизации, математическое программирование, поддержка принятия решений, программный тренажер, математическое моделирование систем и процессов, визуальное моделирование.

1 Введение

Одной из составляющих обучения специалистов в области разработки автоматизированных систем (АС) является освоение курса дисциплин, посвященных применению математических методов, в частности, методов решения оптимизационных задач. Знания и навыки, полученные студентами в рамках данных дисциплин, необходимы для создания АС, позволяющих эффективно организовать поддержку принятия решений в различных отраслях, управление технологическими и социально-экономическими процессами [1-3].

Выполнение студентами практических заданий по методам оптимизации (в рамках аудиторных занятий или самостоятельной работы) включает построение математических моделей, нахождение решений задач на основе моделей вручную с применением соответствующих алгоритмов (например, симплекс-метода) и/или средств автоматизации вычислений, таких как электронные таблицы и специализированные математические пакеты.

Проверка выполнения таких заданий преподавателем в условиях высокой учебной нагрузки представляет трудозатратный процесс ввиду необходимости оценки правильности большого числа отдельных действий и вычислений, составляющих решение задачи [4-6]. Например, решение задачи определения оптимального пути в графе на основе электронных таблиц и метода булева линейного программирования (БЛП) включает построение математической модели задачи на основе графа, настройку необходимых данных, формул и параметров решения в электронной таблице, визуальное представление найденного решения [7]. «Ручная» проверка выполнения подобных заданий способствует снижению точности в результатах оценивая.

Тесты, даже при использовании систем автоматизации обучения подобных Moodle [8-10], позволяют проверить только знание отдельных терминов, формул, действий, связанных с решением задач оптимизации, но не взаимосвязанную последовательность этапов решения практического задания студентом в целом.

Актуальной научно-практической задачей является развитие программных тренажеров, интегрированных в единую образовательную среду вуза, позволяющих автоматизировать, и как следствие, упростить и повысить точность процессов генерации и оценки выполнения вариантов упражнений по методам оптимизации.

2 Концепция информационной системы управления жизненным циклом упражнений по методам оптимизации на основе программных тренажеров

На рис. 1 схематично показана концепция (структура) разрабатываемой автоматизированной информационной системы (АИС) управления жизненным циклом (ЖЦ) упражнений по изучению методов оптимизации и ее связь компонентами учебного процесса. На основе требуемых элементов компетенций согласно образовательной программе преподаватель настраивает параметры контроля знаний, умений и владений (ЗУВов) в АИС, корректирует процесс обучения по результатам оценивания в АИС.

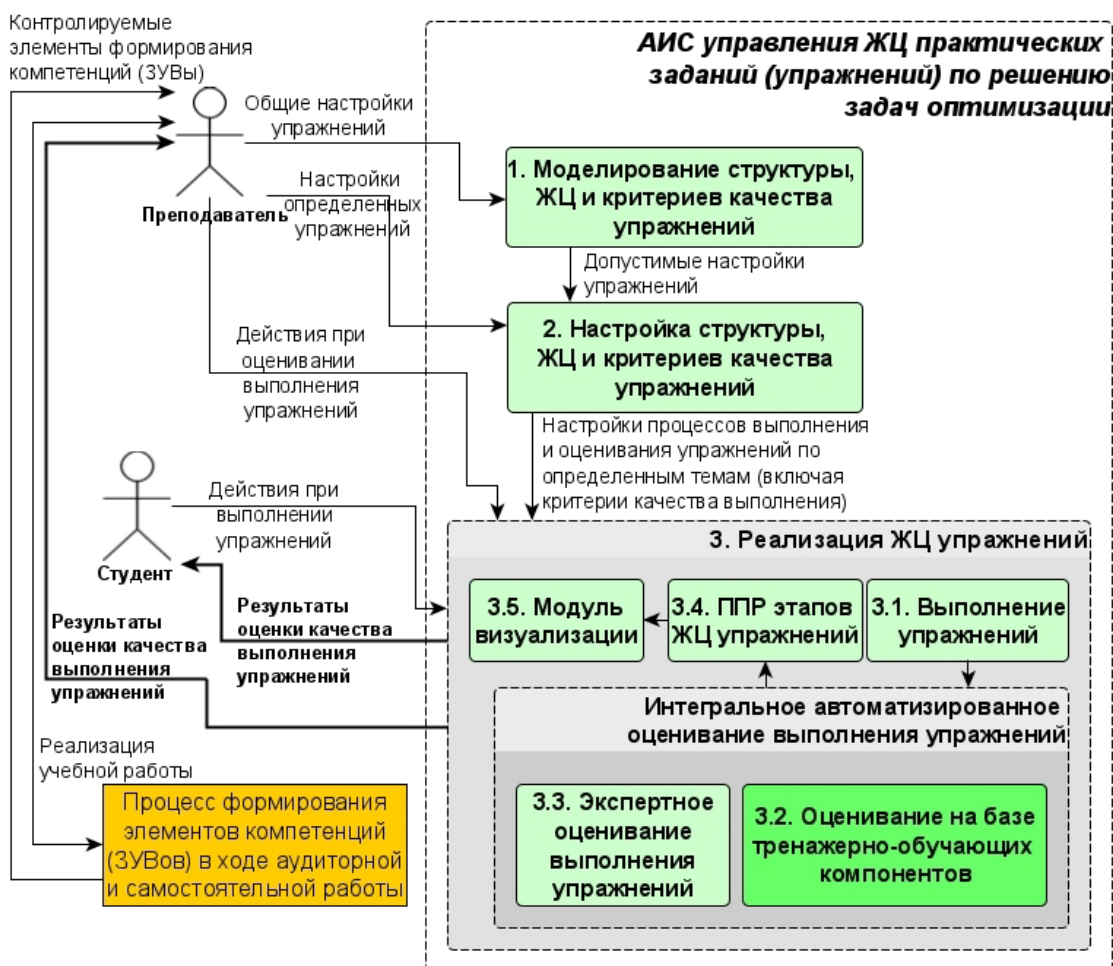


Рис. 1. – Структура АИС управления ЖЦ упражнений

Управление ЖЦ упражнений включает:

- 1) настройку допустимых состояний упражнений в процессе обучения

(например, «упражнение не выполнялось», «упражнение выполнено не успешно 1-й раз», «упражнение выполнено не успешно 2-й раз», «упражнение выполнено успешно»);

2) поддержку принятия решений (ППР) в ходе реализации ЖЦ упражнений (определение и визуализация переходов между состояниями, например, требуется переход к новому упражнению или повторное выполнение текущего; контроль динамики количества и качества выполнения упражнений).

Важным элементом ППР в АИС (рис. 1) являются программные тренажеры (тренажерно-обучающие компоненты). В отличие от традиционной «ручной» проверки преподавателем упражнений в ходе контроля знаний и навыков при изучении методов математического программирования, указанные компоненты осуществляют функцию генерации вариантов упражнений и их автоматической проверки на основе свойств математических моделей задач оптимизации.

Данные функции способствуют снижению отрицательных последствий «человеческого фактора» при проведении оценивания преподавателем. Согласно схеме на рис. 1, в АИС реализовано сочетание автоматического и экспертного (автоматизированного) оценивания решений упражнений, что важно при проверке результатов выполнения наиболее сложных, нестандартных заданий, где требуется роль преподавателя в ходе оценки. Обеспечивается хранение в базе данных (БД) АИС всей информации о ЖЦ для последующей обработки в программных модулях.

Разработана автоматная модель (диаграмма состояний UML) процесса выполнения и оценки результатов упражнения по решению задачи нахождения оптимального пути в графе – построению математической модели задачи булева ЛП. Данная визуальная модель показана на рис. 2.



Рис. 2. – Диаграмма состояний (автоматная модель) для упражнения по решению задачи нахождения оптимального пути в графе

Состояния и подсостояния, показанные в модели на рис. 2, отражают основные шаги решения задач математического программирования данного вида, причем результат выполнения студентом каждого шага оценивается тренажерной системой автоматически. Предоставлены возможности контролировать отдельные этапы выполнения упражнения, что повышает точность общей оценки навыков по решению задач математического программирования, и позволяет генерировать студенту рекомендации по каждому этапу решения задачи.

Автоматные модели в нотации диаграмм состояний UML, аналогичные рис. 2, позволяют комплексно и формализовано описать имитируемый в упражнении сценарий выполнения шагов решения задачи математического программирования и оценивания качества выполнения данных шагов обучаемым с учетом условий переходов между шагами, определяемых результатами оценивания и заданным режимом выполнения упражнения. Режим обучения, определяет, в частности, наличие управляющих воздействий студенту о неверно выполненных шагах задачи по завершении каждого шага, а не только в конце упражнения в целом.

Рассмотренные структура АИС и автоматные модели определяют исходные требования для реализации программной подсистемы решения оптимизационных задач как части информационной системы обучения студентов вуза.

3 Алгоритмическое и программное обеспечение тренажерной подсистемы для контроля навыков решения задач оптимизации

Рассмотрим алгоритмы оценивания выполнения упражнений в АИС на примере задачи определения минимального пути в графе, решаемой на основе метода БЛП. Исходный граф, предоставленный обучаемому в интерфейсе АИС, показан на рис. 3. Искомый оптимальный (минимальный) путь в графе изображен на рис. 4.

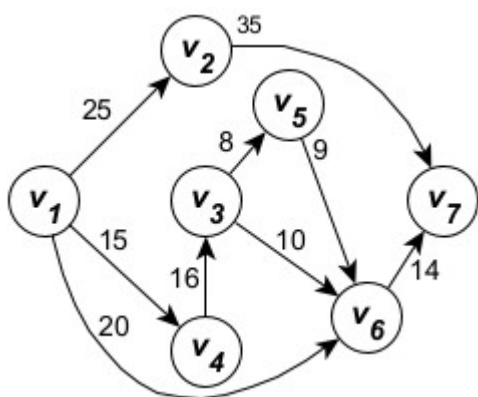


Рис. 3. – Исходный граф для задачи min пути в АИС

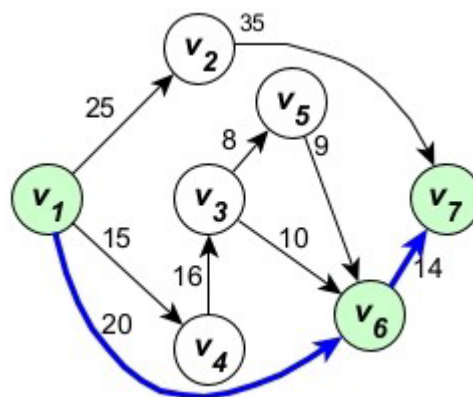


Рис. 4. – Пример обозначения min пути в исходном графе

Математическая постановка задачи в соответствии с графом на рис. 3 представлена ниже:

$$25x_{12} + 15x_{14} + 20x_{16} + 35x_{27} + 8x_{35} + \\ + 10x_{36} + 16x_{43} + 9x_{56} + 14x_{67} \rightarrow \min$$

$$x_{12} + x_{14} + x_{16} = 1$$

$$x_{27} + x_{67} = 1$$

$$x_{12} - x_{27} = 0$$

$$x_{43} - x_{35} - x_{36} = 0$$

$$x_{14} - x_{43} = 0$$

$$x_{35} - x_{56} = 0$$

$$x_{16} + x_{36} + x_{56} - x_{67} = 0$$

$$x_{12}, x_{14}, x_{16}, x_{27}, x_{35}, x_{36}, x_{43}, x_{56}, x_{67} \in \{0, 1\}$$

На рис. 5 и рис. 6 показаны две вариации интерфейсов построения обучаемым математической модели для описанной выше задачи оптимизации при выполнении упражнения в АИС. Процесс построения математической модели в интерфейсе, и соответственно, сложность выполнения данного этапа упражнения, зависит от числа допустимых для изменения студентом параметров модели (коэффициенты, число переменных, названия переменных, индексы переменных и т.д.). Сложность упражнения возрастает по мере увеличения числа параметров.

В интерфейсе на рис. 5 изменяемыми параметрами являются коэффициенты переменных в ЦФ, знаки переменных в ограничениях, знаки операций, правые части ограничений. Причем некоторые значения пользователь вводит произвольно в текстовых полях, а некоторые значения выбирает из списка готовых вариантов выбора, что также влияет на специфику выполнения упражнения.

В интерфейсе на рис. 6 число управляемых параметров увеличилось, в частности, студенту требуется помимо параметров, устанавливаемых в интерфейсе на рис. 5, также определить число переменных в ЦФ и каждом из ограничений, что усложняет решение задачи.

Эталонное представление исходных данных и формул для решения рассматриваемой задачи в электронной таблице (на примере MS Excel [7]) показано на рис. 7.

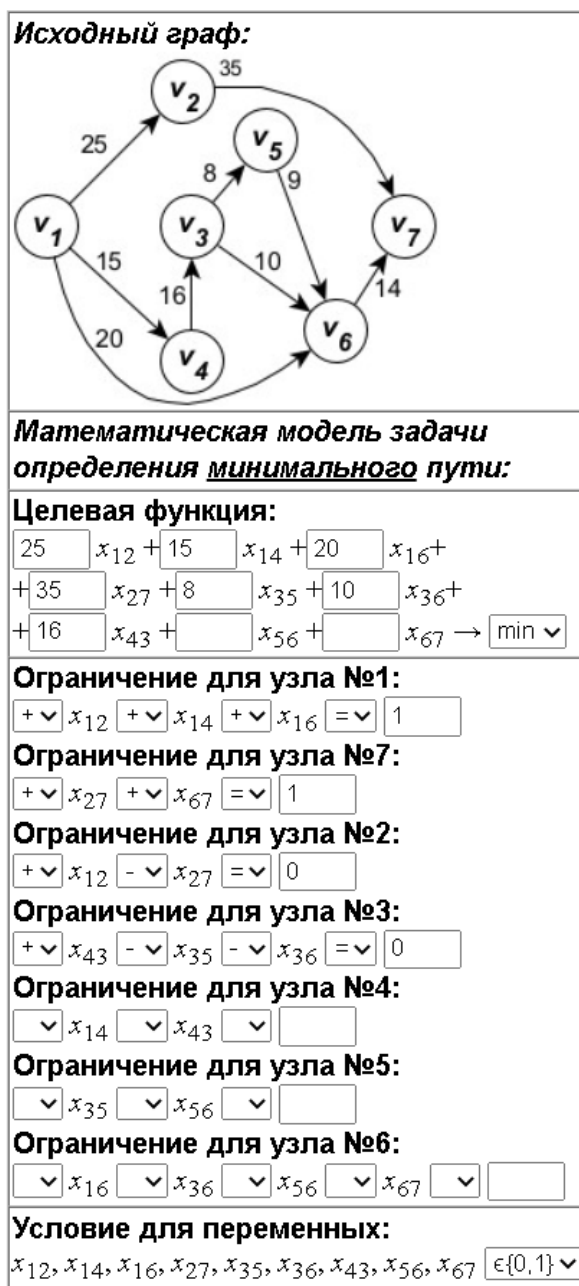


Рис. 5. – Разработка математической модели задачи БЛП в АИС (вариация №1)

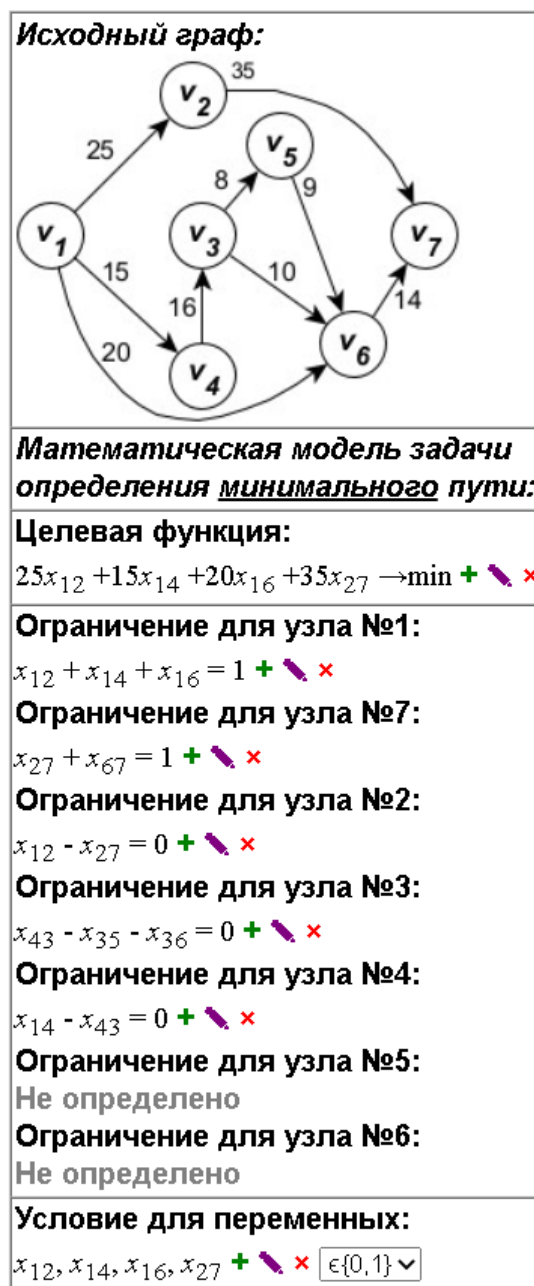


Рис. 6. – Разработка математической модели задачи БЛП в АИС (вариация №2)

Интерфейс АИС, имитирующий заполнение листа электронной таблицы в упражнении для рассматриваемой задачи, показан на рис. 8.

	A	B	C	D	E	F
	v_i	v_j	c_{ij}	Переменные (x_{ij}):	Ограничения:	Значение ЦФ:
1	1	2	25	0	=СУММ(D2:D4)	=СУММПРОИЗВ(C2:C10;D2:D10)
2	1	4	15	0	=СУММ(D5;D10)	
3	1	6	20	1	=D2-D5	
4	2	7	35	0	=D8-СУММ(D6:D7)	
5	3	5	8	0	=D3-D8	
6	3	6	10	0	=D6-D9	
7	4	3	16	0	=СУММ(D4;D7;D9)-D10	
8	5	6	9	0		
9	6	7	14	1		

Рис. 7. – Представление исходных данных и формул в электронной таблице

Динамика заполнения ячеек отражается в форме разных цветов пиктограммы «карандаш», что позволяет обучаемому студенту отследить прогресс в выполнении упражнения. Пиктограммы «карандаш» позволяют показать изменяемые ячейки. Число изменяемых ячеек определяет сложность данного этапа упражнения.

	A	B	C	D	E	F
	v_i	v_j	c_{ij}	x_{ij}	Ограничения:	Значение ЦФ:
1	1	2	25		=СУММ(D2:D4)	=СУММПРОИЗВ(C2:C10;D2:D10)
2	1	4	15		=СУММ(D5;D10)	
3	1	6	20		=D5-D2	
4	2	7	35		=D8-СУММ(D6:D7)	
5	3	5	12			
6	3	6				
7	4	3				
8	5	6				
9	6	7				

Рис. 8. – Заполнение имитируемого листа электронной таблицы при решении задачи оптимизации в АИС

Для установки формулы в определенной ячейке имитируемой электронной таблицы посредством нажатия пиктограммы «карандаш», обучаемому также может быть доступен интерфейс разного уровня сложности, в частности, предоставляющий выбор только названия функции и диапазонов ячеек, или произвольное конструирование формул.

Далее на основе имитации инструмента «Поиск решения» или его аналога для используемого табличного процессора производится настройка

процесса решения задачи, определяется результат количественного решения задачи, и обучаемый обозначает графически оптимальный путь в исходном графе (в интерфейсе, аналогичном рис. 4).

Без применения тренажерных компонентов АИС указанные выше этапы решения задачи выполняются обучаемым в табличном процессоре, отчетная документация оформляется в текстовом редакторе для дальнейшей проверки преподавателем. На основе тренажера указанные этапы решения задачи осуществляются студентом в интерактивных формах АИС с последующей автоматической оценкой на основе знаний о выполнении данных шагов при решении задач математического программирования.

Рассмотрим специфику автоматического оценивания для этапа №2.2 выполнения задания (согласно модели из рис. 2), заключающегося в представлении исходных данных и формул в электронной таблице. Автоматически производится сбор первичных данных о представлении структуры задачи математического программирования в электронной таблице. Проверяется корректность заполнения ячеек константами и формулами. Оценка корректности заполнения g -й изменяемой ячейки оценивается безразмерной величиной $K_g \in [0;1]$, для вычисления которой в ряде случаев допускается вариативность формул. Для ячеек, заполненных константами, (например, C5) $K_g = 1$, если значение в ячейке заполнено верно, $K_g = 0$ – значение заполнено не верно.

Для ячеек с формулами предусматриваются разные способы вычислений. В простейшем случае $K_g = 1$ при полном соответствии с эталонной формулой, $K_g = 0$ – при наличии хотя бы одного несоответствия с эталонной формулой. Для учета в оценке выполнения упражнения частичного соответствия установленной студентом и эталонной формул допустимо применение различных алгоритмов. Рассмотрим пример

вычисления степени соответствия формулы для левой части ограничения в ячейке D8 (рис. 8) с эталонной формулой. В таблице 1 описаны шаги расчета. Здесь $M_{std.}$ означает теоретико-множественное представление формулы, установленной студентом в имитируемой электронной таблице, а $M_{etl.}$ ($M'_{etl.}$) – эталонной формулы.

Таблица № 1

Расчет степени соответствия формул в имитируемой электронной таблице

$M_{std.} = \{+D4, -D5, +D7, -D9, -D10\}$	
Вариант расчета №1	Вариант расчета №2
$M_{etl.} = \{+D4, +D7, +D9, -D10\}$	$M'_{etl.} = \{-D4, -D7, -D9, +D10\}$
$N_{11} = M_{etl.} = 4$ $N_{12} = M_{etl.} \cap M_{std.} = 3$ $N_{13} = M_{std.} - N_{12} = 2$	$N_{21} = M'_{etl.} = 4$ $N_{22} = M'_{etl.} \cap M_{std.} = 1$ $N_{23} = M_{std.} - N_{22} = 4$
$K_1 = \frac{N_{12}}{N_{11} + N_{13}} = \frac{3}{4 + 2} = 0.5$	$K_2 = \frac{N_{22}}{N_{21} + N_{23}} = \frac{1}{4 + 4} = 0.125$

С учетом инвариантности правильных решений задачи итоговая оценка корректной установки формулы в ячейке вычисляется следующим образом:
 $K = \max \{K_1, K_2\} = \max \{0.5, 0.125\} = 0.5$.

При учете частичного совпадения введенной обучаемым формулы с эталонной допустимы модификации формул для вычисления параметров N_{12} , N_{13} , N_{22} , N_{23} из таблицы 1. В частности, учитывается случай, если адрес ячейки совпадает в $M_{std.}$ и $M_{etl.}$ ($M'_{etl.}$), но не совпадает знак. Для вычисления значений N_{12} , N_{13} , N_{22} , N_{23} , K_1 , K_2 формулы будут модифицированы следующим образом:

$$N'_{12} = \sum_{r=1}^{U_{12}} v_r = 1 + 1 + 0.5 + 1 = 3.5, \text{ где } v_r \in [0; 1] - \text{величина соответствия } r\text{-го элемента}$$

формулы, установленной обучаемым, эталонной формуле, U_{12} – общее число

частично или полностью совпадающих элементов множеств $M_{std.}$ и $M_{etl.}$;

$N'_{13} = \sum_{t=1}^{U_{13}} s_t = 1 + 0.5 = 1.5$, где $s_t \in [0;1]$ – индикатор наличия t -го элемента только в

формуле обучаемого, U_{13} – общее число элементов, которые присутствуют полностью или частично только в формуле обучаемого (множестве $M_{std.}$);

$$K'_1 = \frac{N'_{12}}{N_{11} + N'_{13}} = \frac{3.5}{4 + 1.5} \approx 0.64;$$

$$N'_{22} = 0.5 + 0.5 + 1 + 0.5 = 2.5;$$

$$N'_{23} = 0.5 + 1 + 0.5 + 0.5 = 2.5;$$

$$K'_2 = \frac{N'_{22}}{N_{21} + N'_{23}} = \frac{2.5}{4 + 2.5} \approx 0.38.$$

С учетом инвариантности правильных решений задачи итоговая оценка корректной установки формулы в ячейке вычисляется следующим образом:

$$K' = \max \{K'_1, K'_2\} = \max \{0.64, 0.38\} = 0.64.$$

Пример визуальной индикации корректного заполнения обучаемым имитируемой электронной таблицы представлен на рис. 9. Результаты оценивания, аналогичные рис. 9, отображаются либо в процессе упражнения, либо по завершении его выполнения в зависимости от заданного преподавателем в настройках режима обучения.

	A	B	C	D	E	F
1	v_i	v_j	c_{ij}	x_{ij}	Ограничения:	Значение ЦФ:
2	1	2	25		=СУММ(D2:D4)	=СУММПРОИЗВ(C2:C10;D2:D10)
3	1	4	15		=СУММ(D5;D10)	
4	1	6	20		=D5-D2	
5	2	7	35		=D8-СУММ(D6:D7)	
6	3	5	12		=D3-D8	
7	3	6	10		=D6-D9	
8	4	3	18		=СУММ(D4;D7)-СУММ(D5;D8;D10)	
9	5	6	9			
10	6	7	14			

Рис. 9. – Имитируемая в АИС электронная таблица с результатами оценивания

В таблице 2 структурировано представлен пример вычисленных оценок по каждой ячейке электронной таблицы, имитируемой в упражнении (согласно рис. 9), а также весов, означающих степень сложности заполнения ячейки (например, корректная установка формулы сложнее заполнения ячейки константой).

Таблица № 2

Оценки заполнения ячеек имитируемой электронной таблицы

Адрес ячейки	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
K_g	1	1	1	1	0	1	1	1	1
h_g	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Адрес ячейки	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	F2	
K_g	1	1	0.6	1	1	1	0.64	1	
h_g	3	3	3	3	3	3	3	3	

Общая оценка выполнения задания по установке исходных данных и формул для задачи БЛП в имитируемой электронной таблице определяется

$$\text{как } K_{\text{agg.}} = \frac{\sum_{g=1}^{N_{\text{cel}}} (h_g \cdot K_g)}{\sum_{g=1}^{N_{\text{cel}}} h_g} \approx 0.9, \text{ где } K_g \in [0;1] - \text{оценка правильности заполнения } g\text{-й}$$

ячейки электронной таблицы, h_g – вес (сложность, значимость) заполнения g -й ячейки, N_{cel} – общее число ячеек, доступных студенту для заполнения.

Результаты проверки выполнения упражнения наглядно отображаются в веб-интерфейсе, аналогичном рис. 10, содержащем итоговую оценку, а также детализацию результатов оценивания согласно этапам и подэтапам, составляющим упражнение.

Просмотр результата итерации (попытки) выполнения каждого из подэтапов упражнения доступен нажатием ссылки в правом столбце веб-интерфейса на рис. 10. Нажимая ссылку, для каждой итерации доступен

просмотр результатов в интерфейсе, аналогичном рис. 9. Оценка подэтапа зависит от оценок итераций.

Итоговая оценка упражнения: 82,5%		
1. Этап построения математической модели задачи БЛП для поиска min/max пути в графе (70%)		
1.1 Построение мат. модели задачи БЛП (70%)	40%	100%
2. Этап решения задачи БЛП (90%)		
2.1 Представление исходных данных и формул в эл. таблице (80%)	50%	90%
		100%
2.2 Настройка процесса решения мат. модели в эл. таблице (100%)		100%
3. Этап визуализации оптимального пути (92,5%)		
3.1 Визуализация оптимального пути в графическом редакторе (92,5%)	85%	100%

Рис. 10. – Детализированные результаты выполнения упражнения

4 Заключение

1. Разработана и схематично представлена концепция АИС управления ЖЦ упражнений по изучению методов оптимизации. На основе требуемых элементов компетенций согласно образовательной программе преподаватель настраивает процесс контроля знаний, умений и владений в АИС, корректирует процесс обучения по результатам оценивания в АИС. Важным элементом поддержки принятия решений в АИС являются программные тренажеры (тренажерно-обучающие компоненты), осуществляющие функцию генерации вариантов упражнений и их автоматической проверки на основе свойств математических моделей задач оптимизации. Данные функции способствуют снижению отрицательных последствий «человеческого фактора» при проведении оценивания преподавателем.

2. Разработана автоматная модель (диаграмма состояний UML) процесса выполнения и оценки результатов упражнения по решению задачи оптимизации на примере нахождения оптимального пути в графе. Подобные автоматные модели позволяют комплексно и формализовано описать имитируемый в упражнении сценарий решения задачи математического

программирования и оценивания качества выполнения шагов решения обучаемым с учетом условий переходов между шагами, определяемых результатами оценивания и заданным режимом выполнения упражнения.

3. Разработаны алгоритмическое и прототип программного обеспечения тренажерной подсистемы для контроля навыков решения задач оптимизации. Продемонстрированы вариации интерфейсов построения обучаемым математической модели для задачи оптимизации при выполнении упражнения в АИС. Построение модели в интерфейсе, и соответственно, сложность выполнения упражнения, зависит от числа допустимых для изменения студентом параметров модели. Интегральная оценка упражнения определяется оценками отдельных действий в рамках этапов, составляющих выполнение упражнения, и агрегированными оценками каждого этапа.

4. Планируется совершенствование программного и информационного обеспечения рассмотренного тренажера с учетом специфики используемой вузом цифровой образовательной среды. Внедрение тренажера в данную среду позволит автоматизировать и упростить проведение мероприятий текущего и промежуточного контроля знаний и навыков по изучаемым дисциплинам, учитывая число часов, отводимых на дисциплины, методические аспекты преподавания данных дисциплин.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-10162, rscf.ru/project/23-79-10162/.

Литература

1. Романова А.А., Забайкин Ю.В., Ливанова Р.В., Мырксина Ю.А., Шайлиева М.М. Применение самоорганизующихся систем управления для оптимизации процессов в сложных динамических системах при добыче полезных ископаемых // Уголь. 2025. №3. С. 60-68.

2. Фокина Д.А., Кашина Е.В., Берг Т.И., Шаров В.С. Использование

систем поддержки принятия решений как инструмент инновационного развития промышленных предприятий // Экономика и управление: проблемы, решения. 2024. Т. 2. № 9 (150). С. 130-139.

3. Kukharchuk I.B., Trufanova N.M. A decision support system for control over load modes in the cable unit // Russian Electrical Engineering. 2023. Vol. 94. № 11. pp. 796-800.

4. Александров А.Э., Пермикин В.Ю., Пытель И.В. Оптимизационная модель текущего планирования работы с кольцевыми маршрутами на станции выгрузки // Транспорт Урала. 2024. № 4 (83). С. 34-37.

5. Полевщиков И.С., Уколов М.С., Дмитрук М.В., Кравченко Р.А. Автоматизированный контроль навыков решения задач по нечеткому моделированию на основе компьютерного тренажерного комплекса // Инженерный вестник Дона. 2024. №10. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2024/9553.

6. Polevshchikov I.S., Blagoveshchensky I.G. Modeling optimization problems when training engineering specialists using intelligent training systems // E3S Web of Conferences. 2024. Vol. 486. P. 03020. URL: doi.org/10.1051/e3sconf/202448603020 (Дата обращения: 09.04.2025).

7. Леоненков А.В. Решение задач оптимизации в среде MS Excel. Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2005. 704 с.

8. Моисеенко Н.А. Трансформационное обучение и холистический подход в информационно-образовательной среде технического вуза // Инженерный вестник Дона. 2013. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2034.

9. Писаренко Е.В., Пономарев А.Б., Шевченко А.А., Кондрашина Л.А. Моделирование гетерогенно-каталитических процессов и разработка компьютерных тестов в среде дистанционного обучения Moodle // Успехи в химии и химической технологии. 2022. Т. 36. № 2 (251). С. 74-78.

10. Тугашова Л.Г. Разработка электронного учебного курса по моделированию систем управления // Системный анализ в науке и образовании. 2021. № 4. С. 107-112.

References

1. Romanova A.A., Zabaykin Yu.V., Livanova R.V., Myrksina Yu.A., Shaylieva M.M. Ugol'. 2025. №3. pp. 60-68.
2. Fokina D.A., Kashina E.V., Berg T.I., Sharov V.S. Ekonomika i upravlenie: problemy, resheniya. 2024. Vol. 2. № 9 (150). pp. 130-139.
3. Kukharchuk I.B., Trufanova N.M. Russian Electrical Engineering. 2023. Vol. 94. № 11. pp. 796-800.
4. Aleksandrov A.E., Permikin V.Yu., Pytel' I.V. Transport Urala. 2024. № 4 (83). pp. 34-37.
5. Polevshchikov I.S., Ukolov M.S., Dmitruk M.V., Kravchenko R.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2024, №10. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2024/9553.
6. Polevshchikov I.S., Blagoveshchensky I.G. E3S Web of Conferences. 2024. Vol. 486. P. 03020. URL: doi.org/10.1051/e3sconf/202448603020 (Date accessed 09.04.2025).
7. Leonenkov A.V. Reshenie zadach optimizatsii v srede MS Excel [Solving optimization problems in MS Excel environment]. Sankt-Peterburg: BKhV-Peterburg, 2005. 704 p.
8. Moiseenko N.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2013, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2034.
9. Pisarenko E.V., Ponomarev A.B., Shevchenko A.A., Kondrashina L.A. Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii. 2022. Vol. 36. № 2 (251). pp. 74-78.
10. Tugashova L.G. Sistemnyy analiz v nauke i obrazovanii. 2021. № 4. pp. 107-112.

Дата поступления: 30.04.2025

Дата публикации: 25.06.2025