

Метод сетевого экономико-математического моделирования оптимизации адаптивного управления инвестиционным проектированием

А. Ф. Шориков¹ ✉, Е. В. Буценко² 

¹Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,
г. Екатеринбург, Россия

²Уральский государственный экономический университет,
г. Екатеринбург, Россия

✉ afshorikov@mail.ru

Аннотация. Для успешной деятельности любого хозяйствующего субъекта в области инвестиционного проектирования необходимо иметь современный инструментарий управления его процессами. В статье рассматривается процесс оптимизации адаптивного управления инвестиционными проектами для хозяйствующего субъекта при наличии возможности введения обратной связи. В качестве целевой функции (оценочного функционала) в исследуемой оптимизационной задаче рассматривается значение длительности времени для исполнения инвестиционного проекта в целом, которое требуется минимизировать. Для решения этой задачи предлагается новый метод сетевого экономико-математического моделирования оптимизации адаптивного управления инвестиционным проектированием. Предлагаемый метод позволяет сформировать класс допустимых стратегий адаптивного управления (управления по принципу обратной связи) процессом реализации для рассматриваемого инвестиционного проекта. В рамках этого класса стратегий формируется стратегия оптимального адаптивного управления реализацией инвестиционного проекта, вычисляются оптимальное время его реализации и оптимальный календарный график реализации проекта в целом, соответствующие стратегии оптимального адаптивного управления. В работе описывается новая оптимизационная сетевая экономико-математическая модель, учитывающая возможность адаптивного управления реализацией рассматриваемого инвестиционного проекта, и предлагается новый метод для решения этой задачи. Проведена практическая реализация рассматриваемого метода решения на конкретном примере инвестиционного проектирования. Полученные в работе результаты показывают высокую степень эффективности используемого метода. Дальнейшее развитие данного направления может быть связано с разработкой компьютерной модели процессов реализации инвестиционных проектов и созданием систем поддержки принятия решений при управлении их реализацией.

Ключевые слова: адаптивное управление; сетевая модель; инвестиционный проект; экономико-математическое моделирование; оптимизация инвестиций; стратегия управления; календарный график.

1. Актуальность исследования

В условиях усложнения динамических процессов в бизнес-системах, структурной перестройки экономики и неравномерности развития

научно-технического прогресса в различных отраслях, высокой изменчивости фондовых и товарно-сырьевых рынков, ориентированных на текущую конъюнктуру, особенно актуальна разработка

и реализация адаптивных моделей управления экономическими процессами. Ввиду постоянно изменяющихся во времени их свойств и условий реализации, они очень сложно поддаются для организации адаптивного управления.

Преимущество адаптивных систем управления состоит в том, что они отражают динамические свойства экономических процессов, позволяют учитывать информационную ценность реализации предыдущих этапов, а также позволяют формировать достаточно точные оценки будущих значений их состояния. При этом такие системы предназначаются как для краткосрочного, так и для долгосрочного планирования [1–8].

На рис. 1 представлена структурная схема управления экономическими процессами с обратной связью.

Реальные бизнес-процессы, в том числе инвестиционные, протекают в постоянно изменяющихся условиях внешней среды. На события и действия исследуемых процессов воздействуют в разное время различные факторы: одни из них по тем или иным причинам ослабляют свое влияние, другие – увеличивают. Поэтому соответствующие экономико-математические модели управления должны адаптироваться к реализации таких процессов. Учитывая, что

большинство реальных экономических процессов являются нестационарными, то для разработки адаптивных систем управления необходимо рассматривать динамические экономико-математические модели.

Адаптация в таких моделях обеспечивается небольшими дискретными сдвигами [3, 4]. В случае сетевого экономико-математического моделирования [9, 10], если рассматриваемый процесс находится в некотором исходном состоянии, т. е. определены текущие значения его параметров, то на их основе формируется календарный план на один шаг вперед. Затем устанавливается отклонение плановых значений параметров от фактических, и полученная ошибка рассогласования используется для корректировки параметров модели с целью ее улучшения. Далее составляется календарный план на следующий период времени, и такая рекуррентная процедура повторяется.

Таким образом, адаптация управления представляет собой рекуррентную процедуру с получением и использованием каждый раз новой информации о реализации текущего состояния исследуемого процесса. Целью такого «обучения» модели является выбор наилучшего значения параметра управления

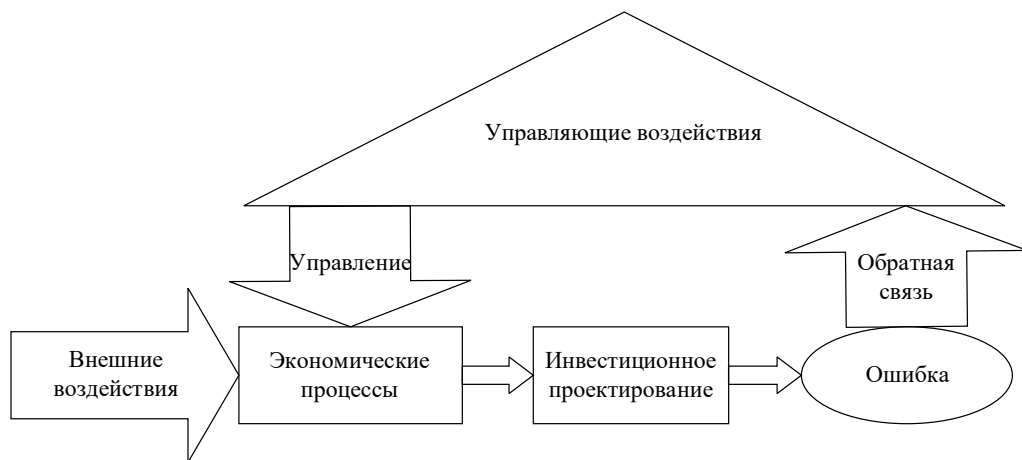


Рис. 1. Управление с обратной связью экономическими процессами

на основе допустимых планов на имеющемся фактическом материале. При этом модели адаптивного управления обладают высокой гибкостью, но при этом достаточно низкой универсальностью, поскольку ориентируются на свойства и условия реализации конкретного процесса. Поэтому при формировании моделей адаптивного управления необходимо в полной мере учитывать имеющиеся свойства, структурные связи между объектами и ограничения на условия реализации исследуемого процесса и использовать их в полном объеме.

Модели и методики организации и реализации поддержки принятия решений с применением адаптивных систем управления необходимо разрабатывать для различных экономических процессов. Для большинства хозяйствующих субъектов экономики одной из основных проблем является недостаток инвестиционных ресурсов для реализации различных проектов. Поэтому разработка и создание модели оптимизации адаптивного управления инвестиционной деятельностью хозяйствующих субъектов является весьма актуальной задачей.

Необходимо отметить, что, несмотря на острую теоретическую и практическую востребованность в нашей стране и в развитых зарубежных экономиках, решение задачи оптимизации адаптивного управления инвестиционным проектированием не разрабатывалось ни у нас, ни за рубежом.

С учетом преодоления значительных трудностей и использования самых современных экономико-математических подходов для разработки предлагаемого метода оптимизации адаптивного управления процессами инвестиционного проектирования на основе сетевого моделирования, практические результаты данной работы должны внести весомый вклад в разработку и создание прикладных систем поддержки принятия

управленческих решений для соответствующих экономических структур.

Целью исследования является создание сетевой экономико-математической модели оптимизации адаптивного управления инвестиционным проектированием для хозяйствующего субъекта и ее практическая реализация.

2. Степень проработанности проблемы

Методологическую основу исследования составили фундаментальные и прикладные научные труды отечественных и зарубежных авторов в области экономико-математического моделирования, адаптивного управления, сетевого планирования и управления [3, 8–10, 12, 18–25].

Проанализируем кратко некоторые современные работы по адаптивному оптимальному управлению в различных областях деятельности человека.

В работе [5] предложена адаптивная модель управления технологическим процессом бурения скважины в условиях информационной неопределенности и наличия внешних возмущений. Для повышения качества управления процессом бурения скважины в условиях непрогнозируемого изменения свойств породы предлагается оптимизационная модель с нелинейной целевой функцией, удовлетворяющей определенным условиям гладкости. Задача оптимизации процесса шарошечного бурения сводится к нахождению экстремума целевой функции, который позволяет определить наилучшие значения параметров исследуемого процесса в условиях неполной информации об изменении свойств породы. Для формирования управляющего воздействия используется отклонение текущего значения управляемой величины от требуемого значения. В процессе управления имеется возможность неточных измерений параметров

его состояния и основных возмущающих воздействий. Для повышения точности управления разработана интеллектуальная автоматизированная система управления (АСУ) с нелинейными обратными связями на сочетании принципов управления по отклонению значений параметров состояния и возмущений (комбинированная система управления) [5].

В работе [7] рассматривается модельный пример природного стохастического процесса, генерирующего последовательность случайных чисел (ПСЧ). Процесс представляется в виде временного ряда (ВР), стационарного или нестационарного. Генерация ПСЧ осуществляется с помощью равномерного и нормального распределений случайных величин. Моделирование ВР выполняется на основе авторегрессии как линейного фильтра ПСЧ. Для краткосрочных прогнозов результата реализации рассматриваемого стохастического процесса параметры регрессии считаются переменными и оцениваются на каждом шаге с учетом длины (временного лага) входящего потока. Предполагается получение информации о развитии процесса в текущий момент времени, предсказание показателей процесса в течение кратковременного периода с учетом преемственности данных и степени их влияния на процесс. Управление реализуется на основе авторегрессии, параметры которой корректируются (адаптируются) по методу антиградиента квадратической ошибки прогноза. В данной работе сконструирована адаптивная модель контроля природного стохастического стационарного процесса, генерирующего последовательность случайных чисел.

В монографии А. А. Емельянова, О. В. Булыгиной и В. Г. Халина рассмотрены методы и инструментальные средства имитационного моделирования для различных технико-экономических приложений [13]. С позиций экономического

инжиниринга рассматриваются механизмы и инструментарии принятия управленческих решений на основе имитационного моделирования с применением элементов искусственного интеллекта. Для моделирования и компьютерной реализации интеллектуального адаптивного управления процессами принятия решений используются акторные сети, генетические алгоритмы, методы нечеткой логики и муравьиные алгоритмы. Приведен анализ исследования временной, денежно-финансовой и геопространственной динамики различных экономических процессов.

В работе [14] отмечено, что использование механизма swot-анализа для предварительной оценки инвестиционных проектов в ряде случаев оказывается недостаточно эффективным, т. к. не дает точных количественных и временных рекомендаций, и предложена методика ранжирования с более высокой точностью оценки, основанная на построении адаптивной имитационной модели, учитывающей согласованность интересов инвестора и потребителя объекта инвестирования и противоречия их интересов при формировании бюджета инвестиционного проекта.

В работе [15] раскрыта специфика адаптивных АСУ производством. Предложена процедура исследования подобных систем в целях построения их формального описания. Показано, что используемый подход позволяет упростить интеграцию процессов как внутри одного структурного элемента, так и в рамках взаимодействия элементов в многоуровневой системе управления. Для решения задачи адаптивного управления производством используется аппарат системного анализа.

Работа [25] посвящена теоретическим и практическим вопросам реализации адаптивного управления в технических системах прямого и непрямого

управления, мультимодального управления с переключением, для специальных типов модельных структур и стратегий управления.

Таким образом, решение поставленной задачи моделирования оптимизации адаптивного управления инвестиционным проектированием на основе сетевого моделирования, позволит дать ответы на актуальные вопросы теории и практики в области экономико-математического моделирования и процессов принятия управленческих решений.

Полученные в работе результаты также основываются на исследованиях [8–25] и являются развитием работ [16–18].

3. Метод сетевого экономико-математического моделирования оптимизации адаптивного управления инвестиционным проектированием

Научная новизна данной работы заключается в разработке экономико-математического инструментария для реализации процессов оптимизации управления инвестиционным проектированием на основе адаптивного подхода и методов сетевого планирования и управления. Для предлагаемого метода разработан алгоритм, позволяющий организовать компьютерное моделирование реализации оптимизации адаптивного управления процессами инвестиционного проектирования. Создана компьютерная программная система для моделирования процесса реализации инвестирования с возможностью отражения его динамических свойств, возможности которой проиллюстрированы на содержательном практическом примере. Полученные в данной работе результаты имеют важное значение для развития теории экономико-математического моделирования и инструментальных средств анализа эффективности

инвестиционной деятельности в условиях динамичности процессов инвестиционного проектирования и внешней среды.

Общая методика сетевого планирования и управления процессами инвестиционного проектирования для хозяйствующего субъекта (без возможности адаптации) приведена в работах [17, 18].

Ниже рассмотрим подробное описание предлагаемого метода.

Пусть имеется конкретный инвестиционный проект, для которого существует априори определенная технология его реализации. При этом предполагается, что технологию реализации проекта в целом можно описать в виде конечного набора работ-операций, упорядоченных по времени с учетом имеющихся технико-экономических условий. Требуется оптимизировать время выполнения инвестиционного проекта в целом, используя возможность управления с обратной связью, на основе знания реализации текущего состояния его исполнения.

Тогда формирование стратегии оптимального адаптивного управления реализацией рассматриваемого инвестиционного проекта в целом, можно описать в виде нижеследующей конечной последовательности действий.

1. Вводятся: начальный массив работ-операций

$$\mathbf{R}(0) = \{R_1(0), R_2(0), \dots, R_{n_0}(0)\} = \mathbf{R}_0,$$

позволяющих реализовать проект в целом, состоящий из n_0 работ-операций ($n_0 \in \mathbf{N}$; здесь и далее, \mathbf{N} – множество всех натуральных чисел) с правилами, определяющими порядок их следования по времени и логическими условиями, и соответствующий ему массив длительности исполнения работ-операций

$$\Delta(0) = \{\Delta_1(0), \Delta_2(0), \dots, \Delta_{n_0}(0)\} = \Delta_0;$$

полагается: значению целочисленного периода времени $\tau := 0$; значению натурального параметра $s := 1$.

2. Тогда для набора работ-операций $R(\tau) = \{R_1(\tau), R_2(\tau), \dots, R_{n_\tau}(\tau)\} = R_\tau$ где $\tau \in \{N \cup \{0\}\}$, учитывая правила, определяющие порядок следования работ-операций по времени и логические условия, и для массива длительности исполнения работ-операций $\Delta(\tau) = \{\Delta_1(\tau), \Delta_2(\tau), \dots, \Delta_{n_\tau}(\tau)\} = \Delta_\tau$, в соответствии с правилами построения сетевой модели (см., например, [9, 10]), решается задача сетевого моделирования – формирования, соответствующей ему оптимальной сетевой модели $WM_\tau^{(e)}(R(\tau)) \in WM_\tau(R(\tau))$ из класса допустимых сетевых моделей $WM_\tau(R(\tau))$ соответствующих набору работ-операций R_τ .

3. Для сформированной сетевой модели $WM_\tau^{(e)}(R(\tau))$ решается задача построения критического пути (см., например, [9, 10])

$R^{(kr.)}(\tau) = \{R_1^{(kr.)}(\tau; \tau_1), R_2^{(kr.)}(\tau_1; \tau_2), \dots, R_{n_\tau}^{(kr.)}(\tau_{n_\tau}^{(kr.)-1}; \tau_{n_\tau}^{(kr.)})\} = R_\tau^{(kr.)} \subseteq R_\tau$ состоящего из «непрерывной» последовательности $n_\tau^{(kr.)}$ критических работ-операций ($n_\tau^{(kr.)} \in N$).

4. На основе сформированного критического пути

$R_\tau^{(kr.)} = \{R_1^{(kr.)}(\tau; \tau_1), R_2^{(kr.)}(\tau_1; \tau_2), \dots, R_{n_\tau}^{(kr.)}(\tau_{n_\tau}^{(kr.)-1}; \tau_{n_\tau}^{(kr.)})\}$ формируется критическое или оптимальное время $T_\tau^{(e)}$ реализации рассматриваемого проекта в целом ($T_\tau^{(e)} \in N$), при этом выполняется следующее условие:

$$\sum_{k=0}^{n_\tau^{(kr.)}-1} (\tau_{k+1} - \tau_k) = \tau_{n_\tau^{(kr.)}} - \tau_0 = \tau_{n_\tau^{(kr.)}} - \tau = T_\tau^{(e)} (\tau_0 = \tau).$$

5. Формируется целочисленный массив $T_\tau = \{\tau_k\}_{k \in \overline{0, n_\tau^{(kr.)}}}$, соответствующий событиям-периодам критического пути $R_\tau^{(kr.)} = \{R_1^{(kr.)}(\tau; \tau_1), R_2^{(kr.)}(\tau_1; \tau_2), \dots, R_{n_\tau}^{(kr.)}(\tau_{n_\tau}^{(kr.)-1}; \tau_{n_\tau}^{(kr.)})\}$, где $\tau_0 = \tau$, определяющего наименее ранние сроки начала всех операций, выходящих из соответствующего события, и наиболее поздние сроки завершения всех

операций, входящих в соответствующее событие, для сформированного критического пути, вместе с критическим временем $T_\tau^{(e)}$ они запоминаются (здесь и далее, для $n \in N$, целочисленный массив $\overline{1, n} = \{1, 2, \dots, n\}$).

6. Для сформированной сетевой модели $WM_\tau^{(e)}(R(\tau))$, на основании найденного критического пути и $R_\tau^{(kr.)} = \{R_1^{(kr.)}(\tau; \tau_1), R_2^{(kr.)}(\tau_1; \tau_2), \dots, R_{n_\tau}^{(kr.)}(\tau_{n_\tau}^{(kr.)-1}; \tau_{n_\tau}^{(kr.)})\}$ и исходных данных решается задача календарного планирования – формирования оптимального календарного графика $TG_\tau^{(e)}(R(\tau))$ – описания сроков для исполнения всех работ-операций $R(\tau) = \{R_1(\tau), R_2(\tau), \dots, R_{n_\tau}(\tau)\} = R_\tau$, в виде графика (диаграммы) Ганта, трехмерного графика или в виде таблицы данных (см., например, [9, 15, 16]).

7. В результате решения задачи календарного планирования для каждой работы-операции $R_k(\tau) \in R_\tau = \{R_1(\tau), R_2(\tau), \dots, R_{n_\tau}(\tau)\}$, $k \in \overline{1, n_\tau}$ определяется пара событий $S_k^{(bf)} = (T_k^{(b)}(\tau), T_k^{(f)}(\tau))$, где $T_k^{(b)}(\tau) < T_\tau^{(e)}$ – наименее ранний допустимый срок исполнения k -й работы-операции, а $T_k^{(f)}(\tau) \leq T_\tau^{(e)}$ – наиболее поздний допустимый срок исполнения k -й работы-операции.

8. Если $\tau_1 = \tau_{n_\tau}^{(kr.)} = T_\tau^{(e)}$, то осуществляется переход на пункт 14, в противном случае – на пункт 9.

9. Для периода времени $\tau_1 \in T_\tau$ назовем набор $p(\tau_1) = \{\tau_1, \bar{R}(\tau_1 | R_0, T_\tau)\}$ τ_1 – позицией для рассматриваемого процесса управления инвестиционным проектом, где множество работ-операций $\bar{R}(\tau_1 | R_0, T_\tau)$ определяется следующим соотношением:

$$\bar{R}(\tau_1 | R_0, T_\tau) = \{\bar{R}_1(\tau_1), \bar{R}_2(\tau_1), \dots, \bar{R}_{m_{\tau_1}}(\tau_1)\} \quad (m_{\tau_1} \in N: m_{\tau_1} \leq n_0); \quad (1)$$

$\forall k \in \overline{1, m_{\tau_1}}: \bar{R}_k(\tau_1)$ – работа-операция, которая входит в массив работ-операций $R(0) = R_0$, т. е. $\bar{R}_k(\tau_1) \in R_0 = \{R_1(0), R_2(0), \dots, R_{n_0}(0)\}$ и такая, что

она реализовалась частично или в полном объеме в период времени $t: t = \tau < \tau_1$, т. е. не позднее начала периода времени τ_1 или говорят – к периоду времени τ_1 .

10. Пусть $P(\tau_1) = \{p_k(\tau_1)\}_{k \in \overline{1, r_{\tau_1}}} = \{\tau_1, \bar{R}_k(\tau_1 | R_0, T_\tau)\}_{k \in \overline{1, r_{\tau_1}}}$ – конечное множество всех допустимых τ_1 -позиций для рассматриваемого процесса управления проектом ($r_{\tau_1} \in \mathbb{N}$), отвечающих периоду времени $\tau_1 \in T_\tau$, и таких, что выполняется условие: $\forall k \in \overline{1, r_{\tau_1}}, \exists l \in \overline{1, m_{\tau_1}^{(k)}}$, что работа-операция $\bar{R}_l^{(k)}(\tau_1) \in \bar{R}_k(\tau_1 | R_0, T_\tau) = \{\bar{R}_1^{(k)}(\tau_1), \bar{R}_2^{(k)}(\tau_1), \dots, \bar{R}_{m_{\tau_1}^{(k)}}^{(k)}(\tau_1)\}$ ($m_{\tau_1}^{(k)} \in \mathbb{N}$:

$m_{\tau_1}^{(k)} \leq n_0$), и такая, которая реализовалась частично или в полном объеме в период времени $t: t = \tau_1$, т. е. к периоду времени τ_1 .

11. Определим для $\tau_1 \in T_\tau$ допустимую стратегию адаптивного управления проектом U_a как отображение $U_a: P(\tau_1) \rightarrow 2^{R_0}$, которое каждой допустимой τ_1 -позиции $p(\tau_1) = \{\tau_1, \bar{R}(\tau_1 | R_0, T_\tau)\} \in P(\tau_1)$ ставит в соответствие набор работ-операций $R(\tau_1) \in 2^{R_0}$, а именно:

$$U_a(p(\tau_1)) = R(\tau_1), \quad (2)$$

где $R(\tau_1) = \{R_1(\tau_1), R_2(\tau_1), \dots, R_{n_{\tau_1}}(\tau_1)\} \in 2^{R_0}$ (здесь и далее для любого множества M символом 2^M будем обозначать множество всех его подмножеств; $n_{\tau_1} \in \mathbb{N}: n_{\tau_1} \leq n_0$).

Обозначим символом U_a множество всех допустимых стратегий U_a адаптивного управления инвестиционным проектом.

12. Для периода времени $\tau_1 \in T_\tau$ назовем набор $p^{(e)}(\tau_1) = \{\tau_1, R^{(e)}(\tau_1 | R_0, T_\tau)\} \in P(\tau_1)$ оптимальной τ_1 -позицией для рассматриваемого процесса адаптивного управления инвестиционным проектом, где множество работ-операций $R^{(e)}(\tau_1 | R_0, T_\tau)$ определяется следующим соотношением:

$$R^{(e)}(\tau_1 | R_0, T_\tau) = \{R_1^{(e)}(\tau_1), R_2^{(e)}(\tau_1), \dots, R_{m_{\tau_1}}^{(e)}(\tau_1)\} (m_{\tau_1} \in \mathbb{N}: m_{\tau_1} \leq n_0); \quad (3)$$

$\forall k \in \overline{1, m_{\tau_1}}: R_k^{(e)}(\tau_1)$ – такая и только такая операция, которая входит

в массив операций $R(0) = R_0$, т. е. $R_k^{(e)}(\tau_1) \in R_0 = \{R_1(0), R_2(0), \dots, R_{n_0}(0)\}$ и которая реализовалась в период времени $t: t = \tau < \tau_1$, т. е. к периоду времени τ_1 .

Пусть

$$\hat{R}^{(e)}(\tau_1 | R_0, T_\tau) = \{\hat{R}_1^{(e)}(\tau_1), \hat{R}_2^{(e)}(\tau_1), \dots, \hat{R}_{n_0 - m_{\tau_1}}^{(e)}(\tau_1)\}, \quad (4)$$

$$\forall k \in \overline{1, n_0 - m_{\tau_1}}: (\hat{R}_k^{(e)}(\tau_1) \in R_0) \wedge (\hat{R}_k^{(e)}(\tau_1) \notin R^{(e)}(\tau_1 | R_0, T_\tau)). \quad (5)$$

Тогда справедливо равенство:

$$\begin{aligned} R^{(e)}(\tau_1 | R_0, T_\tau) \cup \hat{R}^{(e)}(\tau_1 | R_0, T_\tau) &= \\ &= \{R_1^{(e)}(\tau_1), R_2^{(e)}(\tau_1), \dots, R_{m_{\tau_1}}^{(e)}(\tau_1)\} \cup \\ &\cup \{\hat{R}_1^{(e)}(\tau_1), \hat{R}_2^{(e)}(\tau_1), \dots, \hat{R}_{n_0 - m_{\tau_1}}^{(e)}(\tau_1)\} = R_0. \end{aligned} \quad (6)$$

13. Определим стратегию оптимального адаптивного управления инвестиционным проектом $U_a^{(e)} \in U_a$ следующим образом:

1) для τ_1 -позиции

$p^{(e)}(\tau_1) = \{\tau_1, R^{(e)}(\tau_1 | R_0, T_\tau)\} \in P(\tau_1)$, пусть

$$\begin{aligned} U_a^{(e)}(p^{(e)}(\tau_1)) &= R^{(e)}(\tau_1) = \{R_0 \setminus R^{(e)}(\tau_1 | R_0, T_\tau)\} = \\ &= \hat{R}^{(e)}(\tau_1 | R_0, T_\tau) = \{R_1(0), R_2(0), \dots, R_{n_0}(0)\} \setminus \\ &\setminus \{R_1^{(e)}(\tau_1), R_2^{(e)}(\tau_1), \dots, R_{m_{\tau_1}}^{(e)}(\tau_1)\} = \{R_1(0), R_2(0), \\ &\dots, R_{n_0}(0)\} \setminus \{R_1^{(e)}(0), R_2^{(e)}(0), \dots, R_{m_{\tau_1}}^{(e)}(0)\} = \\ &= \{\hat{R}_1^{(e)}(\tau_1), \hat{R}_2^{(e)}(\tau_1), \dots, \hat{R}_{n_0 - m_{\tau_1}}^{(e)}(\tau_1)\} = \\ &= \{\hat{R}_1^{(e)}(\tau_1), \hat{R}_2^{(e)}(\tau_1), \dots, \hat{R}_{n_{\tau_1}}^{(e)}(\tau_1)\} = \\ &= \{R_1(\tau_1), R_2(\tau_1), \dots, R_{n_{\tau_1}}(\tau_1)\} = R_{\tau_1}, \end{aligned} \quad (7)$$

где $n_{\tau_1} = n_0 - m_{\tau_1}$; $R^{(e)}(\tau_1 | R_0, T_\tau) = \{R_1^{(e)}(\tau_1), R_2^{(e)}(\tau_1), \dots, R_{m_{\tau_1}}^{(e)}(\tau_1)\}$ – набор работ-операций, соответствующий τ_1 -позиции $p^{(e)}(\tau_1)$; если $R^{(e)}(\tau_1) = R_{\tau_1} = \emptyset$, то полагается: $s := s + 1$; $t_s := \tau_1$; $p_a^{(e)}(t_s) := p^{(e)}(\tau_1)$; $T_a^{(e)} = T_\tau^{(e)}$ и осуществляется переход на пункт 14; в противном случае – полагается: $s := s + 1$; $t_s := \tau_1$; $p_a^{(e)}(t_s) := p^{(e)}(\tau_1)$; на основе части данных, содержащихся в массиве

$\Delta(\tau) = \{\Delta_1(\tau), \Delta_2(\tau), \dots, \Delta_{n_\tau}(\tau)\} = \Delta_\tau$
и имеющимся реальным данным о реализации проекта, вычисляется соответствующий массиву работ-операций $R^{(e)}(\tau_1) = \{R_1(\tau_1), R_2(\tau_1), \dots, R_{n_{\tau_1}}(\tau_1)\} = R_{\tau_1}$ новый массив длительности исполнения работ-операций $\Delta(\tau_1) = \{\Delta_1(\tau_1), \Delta_2(\tau_1), \dots, \Delta_{n_{\tau_1}}(\tau_1)\} = \Delta_{\tau_1}$, отвечающий периоду времени τ_1 ; полагается $\tau := \tau_1$ и осуществляется переход на пункт 3;

2) для τ_1 -позиции

$$\begin{aligned} p(\tau_1) &= \{\tau_1, \bar{R}(\tau_1 | R_0, T_\tau)\} \in \{P(\tau_1) \setminus \{p^{(e)}(\tau_1)\}\}, \\ \text{пусть } U_a^{(e)}(p(\tau_1) = R(\tau_1) &= \{R_0 \setminus \bar{R}(\tau_1 | R_0, T_\tau)\} = \\ &= \hat{R}(\tau_1 | R_0, T_\tau) = \{\hat{R}_{k_1}(\tau_1), \hat{R}_{k_2}(\tau_1), \dots, \\ &\hat{R}_{k_{l_{\tau_1}}}(\tau_1)\} \cup \{\{R_1(0), R_2(0), \dots, R_{n_0}(0)\} \setminus \\ &\setminus \{\bar{R}_1(\tau_1), \bar{R}_2(\tau_1), \dots, \bar{R}_{m_{\tau_1}}(\tau_1)\}\} = \\ &= \{\hat{R}_1(\tau_1), \hat{R}_2(\tau_1), \dots, \hat{R}_{n_0 - m_{\tau_1} + l_{\tau_1}}(\tau_1)\} = \\ &\{\hat{R}_1(\tau_1), \hat{R}_2(\tau_1), \dots, \hat{R}_{n_{\tau_1}}(\tau_1)\} = \\ &= \{R_1(\tau_1), R_2(\tau_1), \dots, R_{n_{\tau_1}}(\tau_1)\} = R_{\tau_1}, \end{aligned} \quad (8)$$

где $\bar{R}(\tau_1 | R_0, T_\tau) = \{\bar{R}_1(\tau_1), \bar{R}_2(\tau_1), \dots, \bar{R}_{m_{\tau_1}}(\tau_1)\}$ – набор работ-операций, соответствующий τ_1 -позиции $p(\tau_1)$, при этом учитывая, что $p(\tau_1) \neq p^{(e)}(\tau_1)$, полагается: $\forall l \in \overline{1, l_{\tau_1}}$ работа-операция $\hat{R}_{k_l}(\tau_1) = \tilde{R}_{k_l}(\tau_1) \cup \bar{R}_{k_l}(\tau_1) \in \bar{R}(\tau_1 | R_0, T_\tau)$, здесь работа-операция $\bar{R}_{k_l}(\tau_1)$ – часть работы-операции $\tilde{R}_{k_l}(\tau_1)$, которая выполнена к периоду времени τ_1 , а $\tilde{R}_{k_l}(\tau_1)$ – оставшаяся часть работы-операции $\tilde{R}_{k_l}(\tau_1)$, которая еще не выполнена к этому периоду времени ($k_l \in \overline{1, n_{\tau_1}}$), т. к., например, произошла задержка ее выполнения, $l_{\tau_1} \in \mathbb{N}$: $n_{\tau_1} = n_0 - m_{\tau_1} + l_{\tau_1}$; l_{τ_1} – число работ-операций, для которых произошла задержка их выполнения к периоду времени τ_1 ; $R(\tau_1) = \{R_1(\tau_1), R_2(\tau_1), \dots, R_{n_{\tau_1}}(\tau_1)\} = R_{\tau_1} \neq \emptyset$ – набор работ-операций, также соответствующий τ_1 -позиции $p(\tau_1)$ и такой, что выполняется условие: $\forall k \in \overline{1, n_{\tau_1}}$ работа-операция $R_k(\tau_1) \in R_0$ и такая, которая реально может реализоваться в период времени $t: t \geq \tau_1$, в частности $\forall l \in \overline{1, l_{\tau_1}}: \hat{R}_l(\tau_1) \in R(\tau_1)$; на основе части данных, содержащихся в массиве $\Delta(\tau) = \{\Delta_1(\tau), \Delta_2(\tau), \dots, \Delta_{n_\tau}(\tau)\} = \Delta_\tau$

и имеющимся реальным данным о реализации проекта, для сформированного массива работ-операций $R(\tau_1) = \{R_1(\tau_1), R_2(\tau_1), \dots, R_{n_{\tau_1}}(\tau_1)\} = R_{\tau_1}$ вычисляется соответствующий ему массив длительности исполнения работ-операций $\Delta(\tau_1) = \{\Delta_1(\tau_1), \Delta_2(\tau_1), \dots, \Delta_{n_{\tau_1}}(\tau_1)\} = \Delta_{\tau_1}$, учитывающий наличие задержки исполнения части работ-операций и отвечающий периоду времени τ_1 ; полагается: $s := s + 1$; $t_s := \tau_1$; $p_a^{(e)}(t_s) := p(\tau_1)$; $\tau := \tau_1$ и осуществляется переход на пункт 3.

14. Выходными результатами рассматриваемого процесса оптимизации адаптивного управления инвестиционным проектом путем реализации стратегии $U_a^{(e)} \in U_a$ является набор данных: $R_a^{(e)} = R(0) = \{R_1(0), R_2(0), \dots, R_{n_0}(0)\} = R_0$ – исходный набор работ-операций; $WM_a^{(e)} = WM_0^{(e)}(R(0))$ – оптимальная сетевая модель; $p_a^{(e)}(t_k)$ – набор t_k -позиций $k \in \overline{1, s}$, соответствующих реализации стратегии оптимального адаптивного управления проектом $U_a^{(e)}$; $T_a^{(e)} = T_\tau^{(e)}$ – оптимальное время реализации проекта, соответствующее реализации стратегии оптимального адаптивного управления проектом $U_a^{(e)}$.

15. Полученные результаты отображаются в форме, удобной для хозяйствующего субъекта (лица, принимающего решения), реализующего процесс оптимизации управления рассматриваемым инвестиционным проектом.

4. Результаты применения метода

В связи с тем, что большая часть инвестиций малого бизнеса связана со сферой общественного питания, в качестве области применения выбрана именно эта сфера.

Рассмотрим инвестиционный проект по реконструкции ресторана. Особенности реконструкции ресторана определяются наличием в нем различных

функциональных зон. Такими зонами являются зал для посетителей, производственные помещения, складские зоны, административно-технические и бытовые помещения.

Реконструкция здания позволяет продлить срок его службы, решить конструктивные и коммунальные проблемы, выразить архитектурные особенности. Выполнение соответствующих работ дает уникальную возможность приобрести дополнительные функциональные качества здания и дополнительные производственные площади, что обеспечивает дополнительную экономическую выгоду реконструируемому объекту. При помощи реконструкции можно также увеличить и показатель энергоэффективности здания.

При реконструкции ресторана основное внимание уделяется его направленности и целевой аудитории, а также месту расположения. С учетом этих факторов определяется дизайн интерьера, проектирование фасадной части и входной группы, подбор освещения и оборудования и др.

Исходные данные укрупненных (основных) и пронумерованных работ-операций рассматриваемого инвестиционного проекта представлены в табл. 1. В этой таблице

также указаны длительности исполнения всех работ-операций и для каждой работы указаны предшествующие ей работы. Тогда для периода времени $\tau = 0$, отвечающего событию 1, имеем начальный массив работ-операций $R(0) = \{R_1(0), R_2(0), \dots, R_{n_0}(0)\} = \{R_1(0), R_2(0), \dots, R_8(0)\} = R_0$ ($n_0 = 18$) и соответствующий ему массив длительности исполнения работ-операций $\Delta(0) = \{\Delta_1(0), \Delta_2(0), \dots, \Delta_{18}(0)\} = \Delta_0$.

В соответствии с описанным выше методом оптимизации адаптивного управления инвестиционным проектированием значения $\tau := 0$ и $s := 0$. Тогда сформированная сетевая модель проекта $WM_{\tau}^{(e)}(R(\tau)) = WM_0^{(e)}(R(0)) \in WM_0(R(0))$ в виде сетевого графика изображена на рис. 2 и соответствует массиву работ-операций $R(\tau) = \{R_1(\tau), R_2(\tau), \dots, R_{n_{\tau}}(\tau)\} = \{R_1(0), R_2(0), \dots, R_{18}(0)\} = R_0$, массиву длительности исполнения работ-операций $\Delta(\tau) = \{\Delta_1(\tau), \Delta_2(\tau), \dots, \Delta_{n_{\tau}}(\tau)\} = \Delta_{\tau} = \Delta(0) = \{\Delta_1(0), \Delta_2(0), \dots, \Delta_{18}(0)\} = \Delta_0$, а также имеющимся логическим условиям и условиям следования для всех работ-операций рассматриваемого инвестиционного проекта. Начальным событием в этой сети является событие под номером 1, финальным – событие под номером 11.

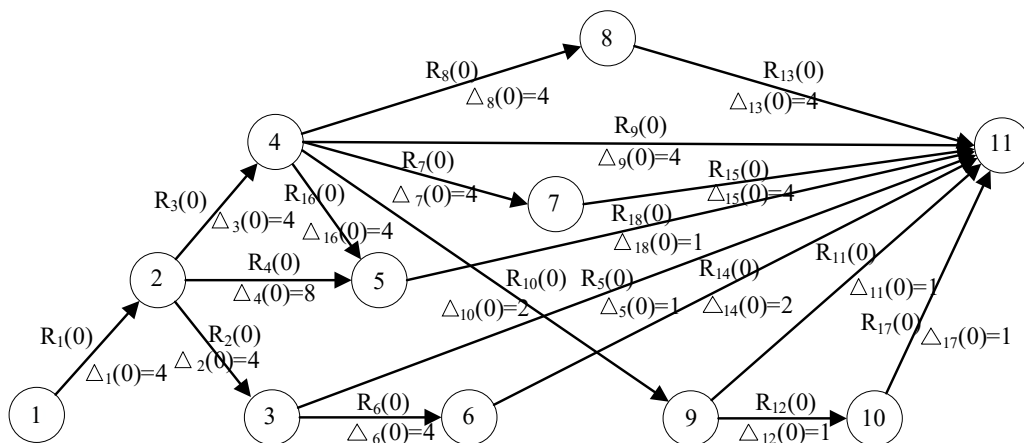


Рис. 2. Используемая сетевая модель инвестиционного проекта

Таблица 1. Исходные данные инвестиционного проекта

№ работы	Содержание работы	Длительность работы, недель	Предшествующие работы
$R_1(0)$	Дизайн-проект, технический проект	$\Delta_1(0) = 4$	—
$R_2(0)$	Выбор оборудования, посуды, инвентаря, мебели	$\Delta_2(0) = 4$	$R_1(0)$
$R_3(0)$	Согласование проекта с Роспотребнадзором, с ГПС МЧС	$\Delta_3(0) = 4$	$R_1(0)$
$R_4(0)$	Ремонт и подготовка помещения (освещение, вывески, декорирование)	$\Delta_4(0) = 8$	$R_1(0)$
$R_5(0)$	Видеонаблюдение и охранная сигнализация	$\Delta_5(0) = 1$	$R_2(0)$
$R_6(0)$	Разработка ТУ и ТИ на блюда	$\Delta_6(0) = 4$	$R_2(0)$
$R_7(0)$	Подбор шеф-повара	$\Delta_7(0) = 4$	$R_3(0)$
$R_8(0)$	Набор персонала	$\Delta_8(0) = 4$	$R_3(0)$
$R_9(0)$	Оплата и доставка оборудования, посуды, инвентаря, мебели	$\Delta_9(0) = 4$	$R_3(0)$
$R_{10}(0)$	Монтаж и установка оборудования	$\Delta_{10}(0) = 2$	$R_3(0)$
$R_{11}(0)$	Запуск оборудования	$\Delta_{11}(0) = 1$	$R_{10}(0)$
$R_{12}(0)$	Установка программного обеспечения	$\Delta_{12}(0) = 1$	$R_{10}(0)$
$R_{13}(0)$	Реклама	$\Delta_{13}(0) = 4$	$R_8(0)$
$R_{14}(0)$	Обучение персонала	$\Delta_{14}(0) = 2$	$R_6(0)$
$R_{15}(0)$	Заключение договоров с поставщиками, на вывоз ТБО	$\Delta_{15}(0) = 4$	$R_7(0)$
$R_{16}(0)$	Уборка стройплощадки	$\Delta_{16}(0) = 4$	$R_3(0)$
$R_{17}(0)$	Расстановка мебели и пробный запуск	$\Delta_{17}(0) = 1$	$R_{12}(0)$
$R_{18}(0)$	Предварительная приемка выполненных работ	$\Delta_{18}(0) = 1$	$R_4(0), R_{16}(0)$

Отметим, что формирование сетевой модели проекта дает неоднозначный результат. А именно, на основе правил построения сетевой модели получены несколько вариантов допустимой для реализации сети (см., например, рис. 3, где символами $F_i(0)$, $i \in \overline{1,6}$, отмечены фиктивные работы, не требующие затрат времени и ресурсов), из которых для использования выбрана только одна из них, которая изображена на рис. 2.

Дальнейшие действия производятся именно с параметрами этой выбранной сетевой модели рассматриваемого инвестиционного проекта.

Разработка календарного плана реализации рассматриваемого инвестиционного проекта заключается в установлении допустимых сроков наступления событий проекта, соответствующих всем работам-операциям, определяющим проект в целом, который

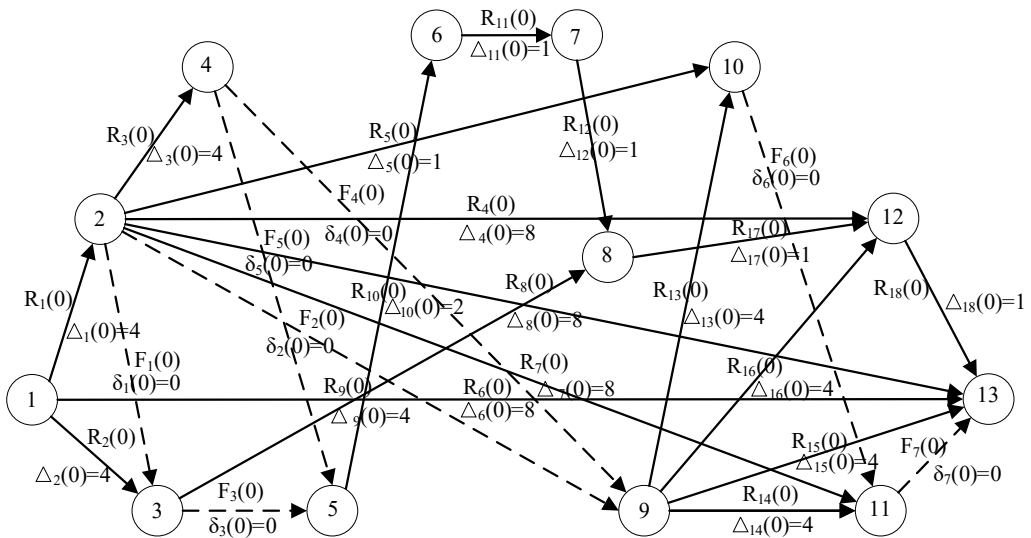


Рис. 3. Допустимая сетевая модель инвестиционного проекта

описывается в виде соответствующего сетевого графика.

Проведем расчет показателей сетевого моделирования проекта в соответствии с предлагаемым методом оптимизации адаптивного управления инвестиционным проектированием, описанным выше в данной работе.

В соответствии с этим методом, на первом этапе на основе исходных данных, включающих начальный массив работ-операций $\mathbf{R}(\tau) = \{R_1(\tau), R_2(\tau), \dots, R_{n_\tau}(\tau)\} = \{R_1(0), R_2(0), \dots, R_8(0)\} = \mathbf{R}_0$, соответствующий ему массив длительности исполнения работ-операций $\Delta(\tau) = \{\Delta_1(\tau), \Delta_2(\tau), \dots, \Delta_{n_\tau}(\tau)\} = \Delta_1(0), \Delta_2(0), \dots, \Delta_{18}(0)\} = \Delta_0$, а также сформированную сетевую модель рассматриваемого инвестиционного проекта, изображенную на рис. 2, необходимо оптимизировать сетевую модель по параметру времени – найти критический путь, критическое время и сформировать соответствующий календарный график реализации инвестиционного проекта в целом, т. е. решить задачу календарного планирования.

Формулы для расчетов временных параметров событий сформированной сетевой модели описаны,

например, в [9, 18]. Для данной сетевой модели, соответствующей рассматриваемому инвестиционному проекту, для начального периода времени $\tau = 0$ имеется два критических пути, которые представлены на рис. 4 и выделены серым цветом и жирными линиями. Длительность каждого из них составляет 16 недель и состоит из соответствующих последовательностей работ-операций: $\{R_1(\tau), R_3(\tau), R_8(\tau), R_{13}(\tau)\}$ и $\{R_1(\tau), R_5(\tau), R_7(\tau), R_{15}(\tau)\}$. В результате сформировано два критических пути $\mathbf{R}^{(кр.)}(\tau) = \{R_1^{(кр.)}(\tau; \tau_1), R_2^{(кр.)}(\tau; \tau_2), \dots, R_{n_\tau}^{(кр.)}(\tau; \tau_{n_\tau}^{(кр.)})\} = \mathbf{R}_\tau^{(кр.)} = \{R_1^{(кр.)}(0; 4), R_2^{(кр.)}(4; 8), R_3^{(кр.)}(8; 12), R_4^{(кр.)}(12; 16)\} = \{R_1(\tau), R_3(\tau), R_8(\tau), R_{13}(\tau)\} = \mathbf{R}^{(кр.)}(0) = \mathbf{R}_0^{(кр.)}$ и $\tilde{\mathbf{R}}^{(кр.)}(\tau) = \{\tilde{R}_1^{(кр.)}(0; 4), \tilde{R}_2^{(кр.)}(4; 8), \tilde{R}_3^{(кр.)}(8; 12), \tilde{R}_4^{(кр.)}(12; 16)\} = \{R_1(\tau), R_5(\tau), R_7(\tau), R_{15}(\tau)\} = \tilde{\mathbf{R}}^{(кр.)}(0) = \tilde{\mathbf{R}}_0^{(кр.)}$, где $n_\tau^{(кр.)} = 4$, имеющих одинаковую суммарную длительность исполнения входящих в них работ-операций. Для выполнения дальнейших действий выбирается любой из этих критических путей, а конкретно – выбираем первый из них, т. е. $\mathbf{R}^{(ед.)}(\tau)$.

Отметим, что продолжительность по времени реализации выбранного критического пути $R^{(ed.)}(\tau) = R^{(ед.)}(0)$ определяет критическое время $T_{\tau}^{(e)} = T_0^{(e)} = 16$, т. е. минимальное время, необходимое для выполнения всех работ-операций, образующих весь комплекс мероприятий для реализации рассматриваемого инвестиционного проекта в целом. За время, которое меньше критического времени, весь комплекс работ для этого инвестиционного проекта не может быть выполнен. Поэтому любая задержка выполнения хотя бы одной работы-операции, входящей в критический путь, увеличивает время выполнения проекта в целом.

Далее, в соответствии с предлагаемым методом, формируется целочисленный массив $T_{\tau} = \{\tau_k\}_{k \in 0, n_{\tau}^{(кр.)}} = T_0 = \{\tau_k\}_{k \in 0, 4} = \{\tau_0, \tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4\} = \{0; 4; 8; 12; 16\}$, соответствующий событиям-периодам $\{1; 2; 4; 8; 11\}$ выбранного критического пути $R_{\tau}^{(кр.)} = \{R_1^{(кр.)}(0; 4), R_2^{(кр.)}(4; 8), R_3^{(кр.)}(8; 12), R_4^{(кр.)}(12; 16)\} = \{R_1(\tau), R_2(\tau), R_3(\tau), R_4(\tau)\} = \{R_1(0), R_2(0), R_3(0), R_4(0)\} = R_0^{(кр.)}$, который определяет наименее ранние сроки начала всех работ-операций, выходящих из соответствующего события, и наиболее поздние сроки завершения всех работ-операций, входящих

в соответствующее событие, для сформированного критического пути, и вместе с критическим временем $T_0^{(e)} = 16$ они запоминаются.

Для сформированной сетевой модели $WM_{\tau}^{(e)}(R(\tau)) = WM_0^{(e)}(R(0))$, на основании найденного критического пути $R_{\tau}^{(кр.)} = \{R_1^{(кр.)}(0; 4), R_2^{(кр.)}(4; 8), R_3^{(кр.)}(8; 12), R_4^{(кр.)}(12; 16)\} = R_0^{(кр.)}$ и соответствующего ему массива длительности исполнения работ-операций $\Delta(\tau) = \{\Delta_1(\tau), \Delta_2(\tau), \dots, \Delta_n(\tau)\} = \Delta_{\tau} = \Delta_1(0), \Delta_2(0), \dots, \Delta_{18}(0)\} = \Delta(0) = \Delta_0$, решается задача календарного планирования – формирования календарного графика $TG_{\tau}^{(e)}(R(\tau)) = TG_0^{(e)}(R(0))$ – описания допустимых сроков для исполнения всех работ-операций $R(\tau) = \{R_1(\tau), R_2(\tau), \dots, R_{n_{\tau}}(\tau)\} = R_{\tau} = \{R_1(0), R_2(0), \dots, R_{18}(0)\} = R(0) = R_0$.

Календарный график исполнения всех работ-операций инвестиционного проекта, соответствующие периоду времени $\tau = 0$, в виде диаграммы Ганта приведен на рис. 5.

По оси абсцисс отмечена длительность исполнения работ-операций проекта в неделях; по оси ординат – их номер; прямоугольниками с черным цветом обозначены не критические работы-операции проекта; прямоугольниками

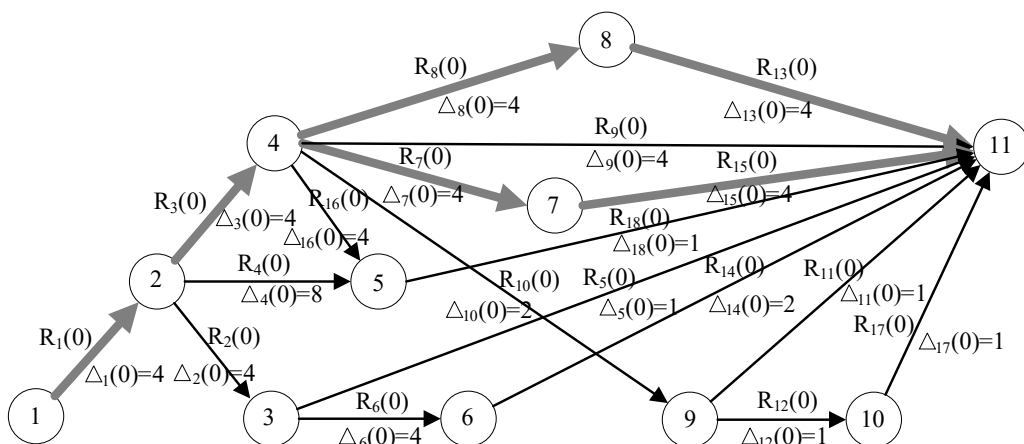


Рис. 4. Критические пути в сетевой модели инвестиционного проекта, соответствующие периоду времени $\tau = 0$

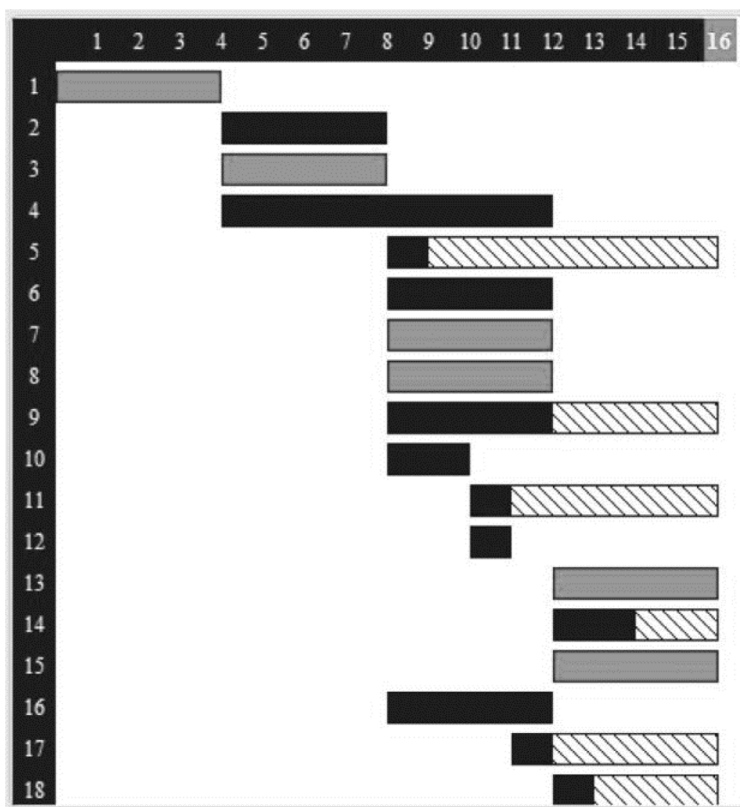


Рис. 5. Календарный график инвестиционного проекта, соответствующий периоду времени $\tau = 0$

с серым цветом обозначены *критические* работы-операции; прямоугольниками со штрихом обозначены свободные резервы времени для исполнения работ-операций.

Таким образом, результаты расчетов показали, что завершение данного инвестиционного проекта планируется через 16 недель. Это условие может быть записано в контракте, и нарушение данного срока повлечет для подрядчика исполнения работ-операций проекта денежный штраф, пропорциональный периоду запаздывания при их реализации. Учитывая это, подрядчику необходимо разработать такой план реализации работ-операций проекта, который учитывает все возможные задержки при его выполнении.

Проведем оптимизацию адаптивного управления реализацией рассматриваемого инвестиционного проекта для

сформированной сетевой модели в соответствии с описанным выше методом.

Рассмотрим подробнее работу-операцию $R_1(\tau) = R_1(0)$ – «Дизайн-проект» и на ее примере покажем реализацию оптимизации управления с обратной связью. Исполнение данной работы предполагает осуществление следующих пяти этапов: 1 – подготовка технического задания; 2 – эскизный проект; 3 – рабочий проект; 4 – инженерные разделы; 5 – дизайн-проект.

В состав полного дизайн-проекта входят обмерный план, план демонтируемых перегородок с привязками, план возводимых перегородок с привязками, отметки высот потолков и привязки, план раскладки полов, план светильников и выключателей, план розеток и слаботочных систем, план расположения сантехники с привязками, план

расположения и открывания дверей, расположение и привязки теплых полов, план расстановки мебели, необходимые узлы и разрезы, развертки, спецификация отделочных материалов, спецификация напольных покрытий, спецификация светильников, спецификация сантехники, спецификация дверных проемов, спецификация предметов мебели. Очевидно, что объем выполняемых работ достаточно большой и требует взаимодействия различных категорий специалистов. В среднем сроки проектирования выполнения работ составляют 1–2 месяца.

Согласно экспертному заключению, выданному экспертной организацией по проверке дизайн-проектов и возможности их реализации, дизайн-проект имеет несоответствие условиям договора: в составе проектной документации по перепланировке помещения отсутствуют чертежи переустройства водопроводных и тепловых сетей внутри здания, а также документы о согласовании такого переустройства с организациями, производящими содержание и обслуживание систем водоснабжения и теплоснабжения здания ресторана.

Вследствие этого работа-операция $R_1(\tau) = R_1(0)$ произведена с задержкой на две недели и к периоду времени τ_1 , т. е. в период времени τ с длительностью $\Delta_1(\tau) = \Delta_1(\tau) = \Delta_1(0) = 4$, выполнена только ее часть $\tilde{R}_1(\tau) = \tilde{R}_1(0) \neq R_1(0) = R_1(\tau)$, а для выполнения оставшейся ее части $\tilde{R}_1(\tau) = \tilde{R}_1(0)$ потребуется период времени длительностью $\Delta_1(\tau) = \Delta_1(0) = 2$, и обозначим $\bar{\Delta}_1(0) = \Delta_1(0) + \Delta_1(0) = 4 + 2 = 6$. В этом случае длительность реализации всего проекта в целом увеличится на две недели, т. к. работа-операция $R_1(\tau) = R_1(0)$ является критической работой проекта, и общая продолжительность исполнения проекта в целом составит в итоге 18 недель.

Отметим, что не все задержки работ-операций увеличивают длительность исполнения всего проекта в целом, т. к. некоторые некритические работы могут иметь резервы времени для их исполнения, т. е. в их рамках можно осуществлять сдвиг начала (окончания) исполнения этих работ.

Пересматривая аналогичным образом все работы-операции проекта, легко корректировать имеющийся план их исполнения и принимать соответствующие управленческие решения, например своевременно составить дополнительное соглашение к договору подряда, избежав, тем самым, негативных последствий.

Далее, используя предложенный в данной статье новый метод оптимизации адаптивного управления для рассматриваемого инвестиционного проекта, выполняется нижеследующая последовательность действий по его реализации.

А именно, формируется отвечающая сложившейся ситуации τ_1 -позиция ($\tau_1 = 4$) проекта $p(\tau_1) = \{\tau_1, \bar{R}(\tau_1 | R_0, T_\tau)\} \in P(\tau_1)$, где $P(\tau_1)$ – конечное множество всех допустимых τ_1 -позиций, а множество работ-операций $\bar{R}(\tau_1 | R_0, T_\tau) = \{\bar{R}_1(\tau_1), \bar{R}_2(\tau_1), \dots, \bar{R}_{m_{\tau_1}}(\tau_1)\} = \{\bar{R}_i(\tau_1)\}$ и является одноэлементным, т. е. $m_{\tau_1} = 1 < n_\tau = 18$, где $\bar{R}_1(\tau_1) = \{\tilde{R}_1(\tau_1) \cup \tilde{R}_1(\tau_1)\} = \{\tilde{R}_1(0) \cup \tilde{R}_1(0)\} = R_1(0) \in \bar{R}(\tau_1 | R_0, T_\tau)$, здесь работа-операция $\tilde{R}_1(\tau_1)$ – часть работы-операции $\bar{R}_1(\tau_1)$, которая выполнена к периоду времени τ_1 , а работа-операция $\tilde{R}_1(\tau_1)$ – оставшаяся для выполнения часть работы-операции $\bar{R}_1(\tau_1)$. При этом очевидно, что $p(\tau_1) = \{\tau_1, \{\bar{R}_1(\tau_1)\}\} \neq p^{(e)}(\tau_1) = \{\tau_1, \{R_1^{(e)}(\tau_1)\}\} = \{\tau_1, \bar{R}^{(e)}(\tau_1 | R_0, T_\tau)\} \in P(\tau_1)$, т. е. $p(\tau_1) \in \{P(\tau_1) \setminus \{p^{(e)}(\tau_1)\}\}$, т. к. работа-операция $\bar{R}_1(\tau_1) = \{\tilde{R}_1(\tau_1) \cup \tilde{R}_1(\tau_1)\} = \{\tilde{R}_1(0) \cup \tilde{R}_1(0)\} = R_1(0)$ не выполнена в полном объеме в предписанные сроки календарного графика, т. е. не реализовалась к периоду времени $t \leq \tau_1 = 4$, а ее оставшаяся часть – есть работа $\tilde{R}_1(\tau_1)$.

Тогда в соответствии с определенной в предлагаемом методе стратегией оптимального адаптивного управления инвестиционным проектом $U_a^{(e)} \in U_a$ полагаем:

$$\begin{aligned} U_a^{(e)}(p(\tau_1)) &= R(\tau_1) = \{R_0 \setminus \bar{R}(\tau_1 | R_0, T_\tau)\} = \\ &= \hat{R}(\tau_1 | R_0, T_\tau) = \bar{R}_1(\tau_1) \cup \{\{R_1(0), R_2(0), \dots, \\ &R_{n_0}(0)\} \setminus \{\bar{R}_1(\tau_1), \bar{R}_2(\tau_1), \dots, \bar{R}_{m_{\tau_1}}(\tau_1)\}\} = \\ &= \bar{R}_1(\tau_1) \cup \{\{R_1(0), R_2(0), \dots, R_{18}(0)\} \setminus \\ &\setminus \{\bar{R}_1(\tau_1)\}\} = \bar{R}_1(\tau_1) \cup \{\{R_1(0), R_2(0), \dots, \\ &R_{18}(0)\} \setminus \{R_1(0)\}\} = \{\bar{R}_1(0), R_2(0), \dots, \\ &R_{18}(0)\} = \{\hat{R}_1(\tau_1), \hat{R}_2(\tau_1), \dots, \\ &\hat{R}_{n_0-m_{\tau_1}+l_{\tau_1}}(\tau_1)\} = \{\hat{R}_1(\tau_1), \hat{R}_2(\tau_1), \dots, \\ &\hat{R}_{n_{\tau_1}}(\tau_1)\} = \{R_1(\tau_1), R_2(\tau_1), \dots, R_{18}(\tau_1)\} = \\ &= \{\bar{R}_1(0), R_2(0), \dots, R_{18}(0)\} = R_{\tau_1}, \quad (9) \end{aligned}$$

где $l_{\tau_1} = 1$; $n_{\tau_1} = n_0 - m_{\tau_1} + l_{\tau_1} = 18 - 1 + 1 = 18$; $\bar{R}(\tau_1 | R_0, T_\tau) = \{\bar{R}_1(\tau_1)\} = \{R_1(0)\}$ – набор работ-операций, соответствующий τ_1 -позиции $p(\tau_1)$ и состоящий из одной работы-операции. На основе данных, содержащихся в массиве $\Delta(\tau) = \{\Delta_1(\tau), \Delta_2(\tau), \dots, \Delta_{18}(\tau)\} = \{\Delta_1(0), \Delta_2(0), \dots, \Delta_{18}(0)\} = \Delta_\tau$, вычисляется соответствующий массиву работ-операций $R(\tau_1) = \{R_1(\tau_1), R_2(\tau_1), \dots, R_{18}(\tau_1)\} = \{\bar{R}_1(0), R_2(0), \dots, R_{18}(0)\} = R_{\tau_1}$ массив длительности исполнения работ-операций $\Delta(\tau_1) = \{\Delta_1(\tau_1), \Delta_2(\tau_1), \dots, \Delta_{18}(\tau_1)\} = \{\Delta_1(0), \Delta_2(0), \dots, \Delta_{18}(0)\} = \Delta_{\tau_1}$; $\Delta_1(\tau) = \Delta_1(0) = 4$; $\Delta_1(\tau_1) = \Delta_1(0) = 2$; полагается: $s := s + 1$; $t_s := \tau_1$; $p_a^{(e)}(t_s) := p(\tau_1)$; $\tau := \tau_1 = 4$.

Далее, в соответствии с предлагаемым методом, в результате решения новой задачи календарного планирования, отвечающей периоду времени $\tau = 4$ и сформированному набору работ-операций $R(\tau) = \{R_1(\tau), R_2(\tau), \dots, R_{18}(\tau)\} = \{\bar{R}_1(0), R_2(0), \dots, R_{18}(0)\} = R_\tau$, формируются два новых критических пути рассматриваемого инвестиционного проекта,

которые представлены на рис. 6 и отмечены серым цветом и жирной линией, и каждому из них соответствует единственное критическое время $T_\tau^{(e)} = 18$. Отметим, что около отрезка-ребра, обозначающего работу-операцию, отмечена длительность ее выполнения, включающая задержку исполнения, если таковая имеется. Для оптимизации адаптивного управления выбирается любой из этих критических путей, конкретно выбираем путь $R^{(kp)}(\tau) = \{R_1^{(kp)}(4;6), R_2^{(kp)}(6;10), R_3^{(kp)}(10;14), R_4^{(kp)}(14;18)\} = R_\tau^{(kp)}$, состоящий из последовательности работ-операций: $\{\bar{R}_1(\tau), R_3(\tau), R_8(\tau), R_{13}(\tau)\} = \{\bar{R}_1(0), R_3(0), R_8(0), R_{13}(0)\}$, где $n_\tau^{(kp)} = 4$, которым соответствует новый массив периодов времени для реализации процесса оптимизации адаптивного управления $T_\tau = \{\tau_k\} \xrightarrow{k \in 0, n_\tau^{(kp)}} \{\tau_k\}_{k \in 0,4} = \{4, 6; 10; 14; 18\} = \{\tau_0, \tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4\}$, где $\tau_0 = \tau = 4$, соответствующий событиям $\{1; 2; 4; 8; 11\}$ рассматриваемой сетевой модели, который определяет наименее ранние сроки начала всех работ-операций, выходящих из соответствующего события, и наиболее поздние сроки завершения всех работ-операций, входящих в соответствующее событие, для сформированного критического пути, и вместе с критическим временем $T_\tau^{(e)} = 18$ они запоминаются. Отметим, что $\bar{R}_1(\tau) = \bar{R}_1(0) \neq R_1(0)$, где $\bar{R}_1(\tau)$ – есть невыполненная часть работы-операции $R_1(0)$ и в этой ситуации имеем: $\tau_1 = \tau + 2 = 4 + 2 = 6$.

На основании сформированного критического пути $R_\tau^{(kp)}$ производится расчет нового календарного графика реализации всех еще невыполненных работ рассматриваемого инвестиционного проекта, описываемых набором работ-операций $R(\tau) = \{R_1(\tau), R_2(\tau), \dots, R_{18}(\tau)\} = \{\bar{R}_1(0), R_2(0), \dots, R_{18}(0)\} = R_\tau$, содержащего допустимые сроки для их реализации.

После устранения задержки, т. е. выполнения исходной работы-операции $R_1(\tau) = \bar{R}_1(\tau) \cup \bar{R}_1(\tau) = \bar{R}_1(0) \cup \bar{R}_1(0) = R_1(0)$

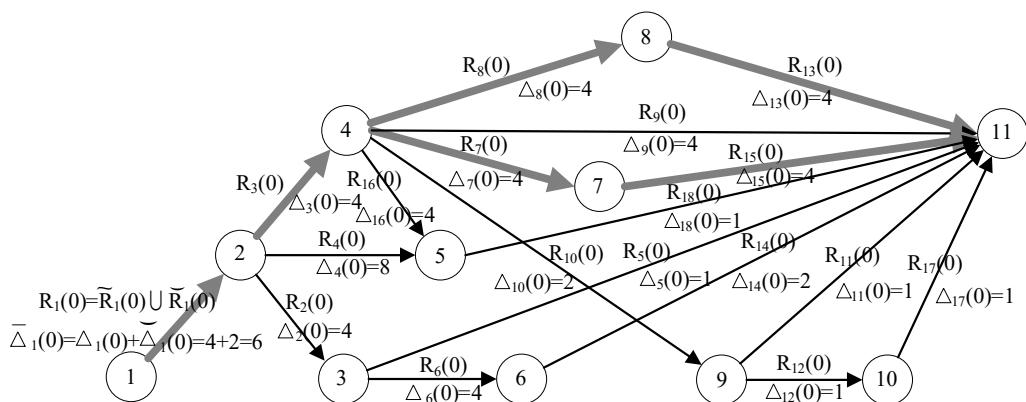


Рис. 6. Критические пути в сетевой модели проекта, соответствующие периоду времени $\tau = 4$

в полном объеме, в соответствии с предлагаемым методом формируется, отвечающая сложившейся ситуации, новая τ_1 -позиция ($\tau_1 = 6$) проекта $p(\tau_1) = \{\tau_1, \bar{R}(\tau_1 | R_0, T_r)\} \in P(\tau_1)$, где $P(\tau_1)$ – множество всех допустимых τ_1 -позиций, а множество работ-операций $\bar{R}(\tau_1 | R_0, T_r) = \{\bar{R}_1(\tau_1), \bar{R}_2(\tau_1), \dots, \bar{R}_{m_r}(\tau_1)\} = \{\bar{R}_1(\tau_1)\}$, т. е. $m_{\tau_1} = 1 < n_0 = 18$. При этом $p(\tau_1) = \{\tau_1, \{\bar{R}_1(\tau_1)\}\} = p^{(e)}(\tau_1) = \{\tau_1, \{R_1^{(e)}(\tau_1)\}\} = \{\tau_1, \bar{R}^{(e)}(\tau_1 | R_0, T_r)\} \in P(\tau_1)$, т. к. работа $\bar{R}_1(\tau_1) = R_1(0)$ – единственная работа-операция массива работ R_0 , которая должна быть выполнена в срок, определенный новым календарным графиком и она реализовалась к периоду времени $t = \tau_1 = 6$.

Тогда в соответствии с определенной в предлагаемом методе стратегией оптимального адаптивного управления инвестиционным проектом $U_a^{(e)} \in U_a$ для τ_1 -позиции $p^{(e)}(\tau_1) = \{\tau_1, \bar{R}^{(e)}(\tau_1 | R_0, T_r)\} \in P(\tau_1)$, имеем:

$$\begin{aligned} & U_a^{(e)}(p^{(e)}(\tau_1)) = \mathbf{R}^{(e)}(\tau_1) = \\ & = \{\mathbf{R}_0 \setminus \overline{\mathbf{R}}^{(e)}(\tau_1 | \mathbf{R}_0, \mathbf{T}_\tau)\} = \hat{\mathbf{R}}^{(e)}(\tau_1 | \mathbf{R}_0, \mathbf{T}_\tau) = \\ & = \{R_1(0), R_2(0), \dots, R_{18}(0)\} \setminus \{R_1^{(e)}(\tau_1), R_2^{(e)}(\tau_1), \\ & \dots, R_{m_{\tau_1}}^{(e)}(\tau_1)\} = \{R_1(0), R_2(0), \dots, R_{18}(0)\} \setminus \\ & \setminus \{R_1^{(e)}(\tau_1)\} = \{R_1(0), R_2(0), \dots, R_{18}(0)\} \setminus \\ & \setminus \{\overline{R}_1(\tau_1)\} = \{R_1(0), R_2(0), \dots, R_{18}(0)\} \setminus \\ & \setminus \{R_1(0)\} = \{R_2(0), R_3(0), \dots, R_{18}(0)\} = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \{\hat{R}_1^{(e)}(\tau_1), \hat{R}_2^{(e)}(\tau_1), \dots, \hat{R}_{n_0 - m_{\tau_1}}^{(e)}(\tau_1)\} = \\
&= \{\hat{R}_1^{(e)}(\tau_1), \hat{R}_2^{(e)}(\tau_1), \dots, \hat{R}_{n_{\tau_1}}^{(e)}(\tau_1)\} = \\
&= \{R_1(\tau_1), R_2(\tau_1), \dots, R_{n_{\tau_1}}(\tau_1)\} = \{R_1(\tau_1), \\
&R_2(\tau_1), \dots, R_{17}(\tau_1)\} = \{R_2(0), R_3(0), \dots,
\end{aligned}$$

$$R_{18}(0)\} = \mathbf{R}_r, \quad (10)$$

где $n_{\tau_1} = n_0 - m_{\tau_1} = 18 - 1 = 17$; $\bar{R}^{(e)}(\tau_1 | \mathbf{R}, \mathbf{T}_\tau) =$
 $= \{R_1^{(e)}(\tau_1)\} = \{R_1(\tau_1)\} = \{R_1(0)\}$ – набор ра-
 бот-операций, соответствующих τ_1 -по-
 зиции $p^{(e)}(\tau_1)$ и состоящий из одной ра-
 боты-операции. Тогда, учитывая, что
 $\mathbf{R}^{(e)}(\tau_1) = \{R_1(\tau_1), R_2(\tau_1), \dots, R_{17}(\tau_1)\} =$
 $= \mathbf{R}_{\tau_1} \neq \emptyset$, то полагается: $s := s + 1$; $t_s := \tau_1$;
 $p_a^{(e)}(t_s) := p^{(e)}(\tau_1)$ на основе данных, содер-
 жащихся в массиве $\mathbf{A}(\tau) = \{A_1(\tau), A_2(\tau),$
 $\dots, A_{18}(\tau)\} = \{A_1(0), A_2(0), \dots, A_{18}(0)\} = \mathbf{A}_\tau$,
 вычисляется соответствующий масси-
 ву работ-операций $\mathbf{R}^{(e)}(\tau_1) = \{R_1(\tau_1),$
 $R_2(\tau_1), \dots, R_{17}(\tau_1)\} = \{R_2(0), R_3(0), \dots,$
 $R_{18}(0)\} = \mathbf{R}_{\tau_1}$ новый массив длитель-
 ности исполнения работ-опера-
 ций $\mathbf{A}(\tau_1) = \{A_1(\tau_1), A_2(\tau_1), \dots, A_{17}(\tau_1)\} =$
 $= \{A_2(0), A_3(0), \dots, A_{18}(0)\} = \mathbf{A}_{\tau_1}$, отвеча-
 ющий новому периоду времени τ_1 ; пола-
 гается $\tau := \tau_1 = 6$.

В результате решения новой задачи календарного планирования, отвечающей периоду времени $\tau = 6$ и сформированному набору работ-операций $\mathbf{R}^{(e)}(\tau_1) = \{R_1(\tau_1), R_2(\tau_1), \dots, R_{17}(\tau_1)\} = \{R_2(0), R_3(0), \dots, R_{18}(0)\} = \mathbf{R}_{\tau_1}$, из двух имеющихся критических путей выбира-

ется единственный новый критический путь для рассматриваемого инвестиционного проекта $R^{(kp)}(\tau) = \{R_1^{(kp)}(6;10), R_2^{(kp)}(10;14), R_3^{(kp)}(14;18)\} = R_\tau^{(kp)}$, где $n_\tau^{(kp)} = 3$, состоящий из последовательности работ-операций $\{R_3(\tau), R_8(\tau), R_{13}(\tau)\} = \{R_3(0), R_8(0), R_{13}(0)\}$, и его длительность составляет 18 недель, т. е. новое критическое время $T_\tau^{(e)} = 18$. Сформированному критическому пути соответствует новый массив периодов времени для реализации процесса оптимизации адаптивного управления $T_\tau = \{\tau_k\}_{k \in 0, n_\tau^{(kp)}} = \{\tau_k\}_{k \in 0, 3} = \{6, 10; 14; 18\} = \{\tau_0, \tau_1, \tau_2, \tau_3\}$, где $\tau_0 = \tau = 6$, который определяет наименее ранние сроки начала всех работ-операций, выходящих из соответствующего события, и наиболее поздние сроки завершения всех работ-операций, входящих в соответствующее событие, для сформированного критического пути, и вместе с критическим временем $T_\tau^{(e)} = 18$ они запоминаются. В этой ситуации имеем: $\tau_1 = \tau + 4 = 6 + 4 = 10$.

Новый критический путь инвестиционного проекта с учетом задержки при выполнении работы $R_1(0)$ представлен на рис. 7. Составляется также новый календарный график, содержащий допустимые сроки для реализации всех еще невыполненных работ-операций рассматриваемого инвестицион-

ного проекта, описываемых набором $R^{(e)}(\tau_1) = \{R_1(\tau_1), R_2(\tau_1), \dots, R_{17}(\tau_1)\} = \{R_2(0), R_3(0), \dots, R_{18}(0)\} = R_{\tau_1}$.

Далее пусть в рассматриваемом модельном примере возникла задержка по времени при выполнении работы-операции $R_1(\tau) = R_2(0)$ данного инвестиционного проекта, которая соответствует комплектованию оборудования, посуды, инвентаря и мебели. Она произошла по причине организационных проблем, связанных с несогласованностью в выборе типов креплений и материалов, и составила три недели.

Вследствие этого, работа-операция $R_1(\tau) = R_2(0)$ произведена с задержкой на три недели и к периоду времени τ_1 , т. е. в период времени τ с длительностью $\Delta_1(\tau) = \tilde{\Delta}_1(\tau) = \Delta_2(0) = 4$, выполнена только ее часть $\tilde{R}_1(\tau) = \tilde{R}_2(0) \neq R_2(0) = R_1(\tau)$, а для выполнения оставшейся ее части $\bar{R}_1(\tau) = \bar{R}_2(0)$ потребуется период времени длительностью $\bar{\Delta}_1(\tau) = \bar{\Delta}_2(0) = 3$, и обозначим $\bar{\Delta}_2(0) = \Delta_2(0) + \Delta_1(0) = 4 + 3 = 7$.

Тогда на основании предлагаемого метода, формируется отвечающая сложившейся ситуации τ_1 -позиция $(\tau_1 = 10)$ проекта $\in P(\tau_1)$, где $P(\tau_1)$ – множество всех допустимых τ_1 -позиций, а множество работ-операций $\bar{R}(\tau_1 | R_\tau, T_\tau) = \{\bar{R}_1(\tau_1), \bar{R}_2(\tau_1), \dots, \bar{R}_{m_{\tau_1}}(\tau_1)\} = \{\bar{R}_1(\tau_1), \bar{R}_2(\tau_1), \bar{R}_3(\tau_1)\}$, т. е. $m_{\tau_1} = 3 < n_0 = 18$,

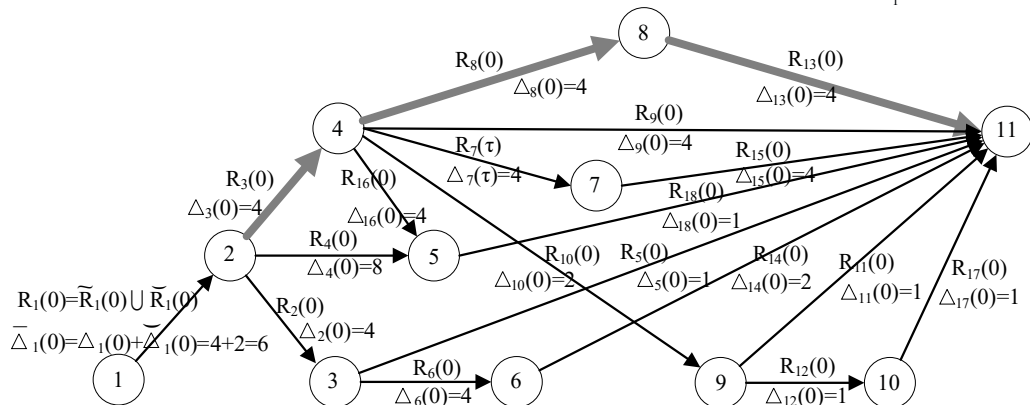


Рис. 7. Критический путь в сетевой модели проекта, соответствующий периоду времени $\tau = 6$

где $\bar{R}_2(\tau_1) = \{\tilde{R}_2(\tau_1) \cup \bar{R}_2(\tau_1)\} = \{\bar{R}_2(0) \cup \bar{R}_2(0)\} = R_2(0) \in \bar{R}(\tau_1 | R_0, T_\tau)$, здесь работа-операция $\bar{R}_2(\tau_1)$ – часть работы-операции $\bar{R}_2(\tau_1)$, которая выполнена к периоду времени τ_1 , а работа-операция $\tilde{R}_2(\tau_1)$ является оставшейся для выполнения ее частью. При этом очевидно, что $p(\tau_1) = \{\tau_1, \{\bar{R}_1(\tau_1), \bar{R}_2(\tau_1), \bar{R}_3(\tau_1)\} \neq p^{(e)}(\tau_1) = \{\tau_1, \{R_1^{(e)}(\tau_1), R_2^{(e)}(\tau_1), R_3^{(e)}(\tau_1)\}\} = \{\tau_1, \bar{R}^{(e)}(\tau_1 | R_\tau, T_\tau)\} \in$, т. е. $p(\tau_1) \in \{P(\tau_1) \setminus \{p^{(e)}(\tau_1)\}\}$, т. к. работа-операция $\bar{R}_2(\tau_1)$ не выполнена в полном объеме в предписанные сроки нового календарного график, т. е. она не реализовалась к периоду времени $t \leq \tau_1 = 10$, а ее оставшаяся часть – есть работа-операция $\tilde{R}_2(\tau_1)$.

Далее, в соответствии с определенной в предлагаемом методе стратегией оптимального адаптивного управления инвестиционным проектом $U_a^{(e)} \in U_a$, полагаем:

$$\begin{aligned} U_a^{(e)}(p(\tau_1)) &= R(\tau_1) = \{R_0 \setminus \bar{R}(\tau_1 | R_\tau, T_\tau)\} = \\ &= \hat{R}(\tau_1 | R_\tau, T_\tau) = \bar{R}_2(0) \cup \{\{R_1(0), R_2(0), \dots, \\ &R_{18}(0)\} \setminus \{\bar{R}_1(\tau_1), \bar{R}_2(\tau_1), \dots, \bar{R}_{m_1}(\tau_1)\}\} = \\ &= \bar{R}_2(0) \cup \{\{R_1(0), R_2(0), \dots, R_{18}(0)\} \setminus \{\bar{R}_1(\tau_1), \bar{R}_2(\tau_1), \\ &\bar{R}_3(\tau_1)\}\} = \bar{R}_2(0) \cup \{\{R_1(0), R_2(0), \dots, R_{18}(0)\} \setminus \\ &\setminus \{R_1(0), R_2(0), R_3(0)\}\} = \{\bar{R}_2(0), R_4(0), R_5(0), \dots, \\ &R_{18}(0)\} = \{\hat{R}_1(\tau_1), \hat{R}_2(\tau_1), \dots, \hat{R}_{n_0-m_1+l_{\tau_1}}(\tau_1)\} = \\ &= \{\hat{R}_1(\tau_1), \hat{R}_2(\tau_1), \dots, \hat{R}_{n_{\tau_1}}(\tau_1)\} = \{R_1(\tau_1), R_2(\tau_1), \dots, \\ &R_{16}(\tau_1)\} = \{\bar{R}_2(0), R_4(0), R_5(0), \dots, R_{18}(0)\} = R_{\tau_1} \quad (11) \end{aligned}$$

где $l = 1$; $n_{\tau_1} = n_0 - m_{\tau_1} + l_{\tau_1} = 18 - 3 + 1 = 16$; $\bar{R}(\tau_1 | R_\tau, T_\tau) = \{\bar{R}_1(\tau_1), \bar{R}_2(\tau_1), \bar{R}_3(\tau_1)\} = \{R_1(0), R_2(0), R_3(0)\}$ – набор работ-операций, соответствующий τ_1 -позиции $p(\tau_1)$ и состоящий из трех работ-операций. На основе данных, содержащихся в массиве $A(\tau) = \{A_1(\tau), A_2(\tau), \dots, A_{17}(\tau)\} = \{A_2(0), A_3(0), \dots, A_{18}(0)\} = A_\tau$, вычисляется соответствующий массиву работ-операций $R(\tau_1) = \{R_1(\tau_1), R_2(\tau_1), \dots, R_{16}(\tau_1)\} = \{\bar{R}_2(0), R_4(0), R_5(0), \dots, R_{18}(0)\} = R_{\tau_1}$ массив длительности исполнения работ-операций $A(\tau_1) = \{A_1(\tau_1), A_2(\tau_1), \dots, A_{16}(\tau_1)\} = \{A_2(0), A_3(0), \dots, A_{18}(0)\} = A_{\tau_1}$;

$\Delta_1(\tau) = \Delta_2(0) = 4$; $\Delta_1(\tau_1) = \bar{\Delta}_2(0) = 3$; полагается: $s := s + 1$; $t_s = \tau_1$; $p_a^{(e)}(t_s) = p(\tau_1)$; $\tau := \tau_1 = 10$.

В соответствии с предлагаемым методом, в результате решения новой задачи календарного планирования, отвечающей периоду времени $\tau = 10$ и сформированному набору работ-операций $R(\tau_1) = \{R_1(\tau_1), R_2(\tau_1), \dots, R_{16}(\tau_1)\} = \{\bar{R}_2(0), R_4(0), R_5(0), \dots, R_{18}(0)\} = R_{\tau_1}$ формируется единственный новый критический путь (рис. 8) рассматриваемого инвестиционного проекта $R^{(кр.)}(\tau) = \{R_1^{(кр.)}(10;13), R_2^{(кр.)}(13;17), R_3^{(кр.)}(17;19)\} = R_\tau^{(кр.)}$, состоящий из трех работ-операций $\{\bar{R}_2(\tau), R_6(\tau), R_{14}(\tau)\}$, а также новый календарный график, описывающий допустимые сроки исполнения всех еще невыполненных работ-операций, которым соответствует новый массив периодов времени для реализации процесса адаптивного управления $T_\tau = \{\tau_k\} \xrightarrow[k \in 0, n_\tau^{(кр.)}]{k \in 0, n_\tau^{(кр.)}} \{\tau_k\}_{k \in 0,3} = \{10;13;17;19\} = \{\tau_0, \tau_1, \tau_2, \tau_3\}$, где $\tau_0 = \tau = 10$. Отметим, что $\bar{R}_2(\tau) \neq R_2(0)$, где $\bar{R}_2(\tau)$ есть невыполненная часть работы-операции $R_2(0)$, и в этой ситуации имеем: $\tau_1 = \tau + 3 = \tau_0 + 3 = 10 + 3 = 13$.

После устранения задержки, т. е. выполнения исполняемой работы-операции $R_1(\tau) = \tilde{R}_1(\tau) \cup \bar{R}_1(\tau) = R_2(0)$ в полном объеме, в соответствии с предлагаемым методом формируется, отвечающая сложившейся ситуации, новая τ_1 -позиция ($\tau_1 = 13$) проекта $p(\tau_1) = \{\tau_1, \bar{R}(\tau_1 | R_0, T_\tau)\} \in P(\tau_1)$, где $P(\tau_1)$ – множество всех допустимых τ_1 -позиций, а множество работ-операций $\bar{R}(\tau_1 | R_0, T_\tau) = \{\bar{R}_1(\tau_1), \bar{R}_2(\tau_1), \dots, \bar{R}_{m_1}(\tau_1)\} = \{\bar{R}_1(\tau_1), \bar{R}_2(\tau_1), \bar{R}_3(\tau_1)\}$, т. е. $m_{\tau_1} = 3 < n_0 = 18$. При этом $p(\tau_1) = \{\tau_1, \bar{R}_1(\tau_1), \bar{R}_2(\tau_1), \bar{R}_3(\tau_1)\} = p^{(e)}(\tau_1) = \{\tau_1, \{R_1^{(e)}(\tau_1), \{R_1^{(e)}(\tau_1), R_2^{(e)}(\tau_1), R_3^{(e)}(\tau_1)\}\} = \{\tau_1, \bar{R}^{(e)}(\tau_1 | R_0, T_\tau)\} \in P(\tau_1)$, т. к. работы из массива $\{\bar{R}_1(\tau_1), \bar{R}_2(\tau_1), \bar{R}_3(\tau_1)\} = \{R_1(0), R_2(0), R_3(0)\}$ есть такие и только такие работы-операции, которые и должны быть выполнены к периоду времени

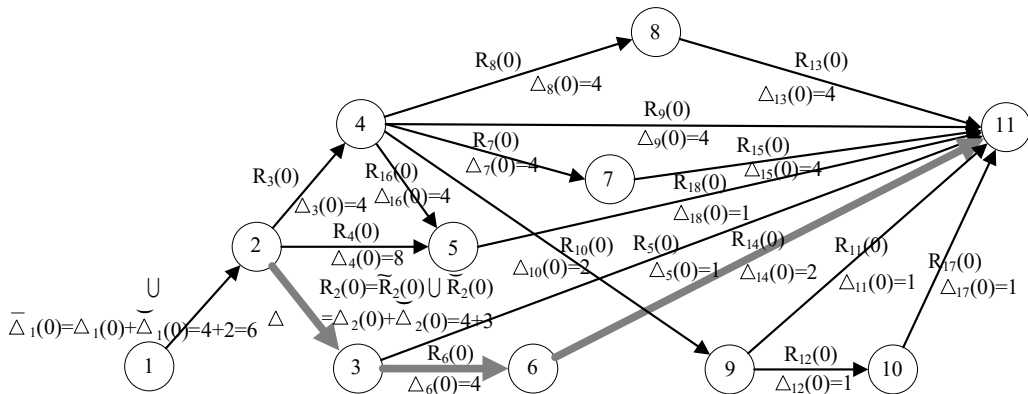


Рис. 8. Критический путь сетевой модели, соответствующий периоду времени $\tau = 10$

$t = \tau_1 = 13$ – в срок, определенный для них сформированным календарным графиком.

Тогда в соответствии с определенной в предлагаемом методе стратегией оптимального адаптивного управления инвестиционным проектом $U_a^{(e)} \in U_a$ для τ_1 -позиции $p^{(e)}(\tau_1) = \{\tau_1, \bar{R}^{(e)}(\tau_1 | R_0, T_\tau)\} \in P(\tau_1)$, имеем:

$$\begin{aligned} U_a^{(e)}(p^{(e)}(\tau_1)) &= R^{(e)}(\tau_1) = \{R_0 | \bar{R}^{(e)}(\tau_1 | R_0, T_\tau)\} = \\ &= \hat{R}^{(e)}(\tau_1 | R_0, T_\tau) = \{R_1(0), R_2(0), \dots, R_{18}(0)\} \setminus \\ &\quad \setminus \{R_1^{(e)}(\tau_1), R_2^{(e)}(\tau_1), \dots, R_{m_{\tau_1}}^{(e)}(\tau_1)\} = \\ &= \{R_1(0), R_2(0), \dots, R_{18}(0)\} \setminus \{R_1^{(e)}(\tau_1), \\ &\quad R_2^{(e)}(\tau_1), R_3^{(e)}(\tau_1)\} = \{R_1(0), R_2(0), \dots, \\ &\quad R_{18}(0)\} \setminus \{\bar{R}_1(\tau_1), \bar{R}_2(\tau_2), \bar{R}_3(\tau_1)\} = \\ &= \{R_1(0), R_2(0), \dots, R_{18}(0)\} \setminus \{R_1(0), R_2(0), R_3(0)\} = \\ &= \{R_4(0), R_5(0), \dots, R_{18}(0)\} = \hat{R}_1^{(e)}(\tau_1), \\ &\dots, \hat{R}_{n_0 - m_{\tau_1}}^{(e)}(\tau_1) = \{\hat{R}_1^{(e)}(\tau_1), \hat{R}_2^{(e)}(\tau_1), \dots, \\ &\quad \hat{R}_{n_{\tau_1}}^{(e)}(\tau_1)\} = \{R_1(\tau_1), R_2(\tau_1), \dots, R_{n_{\tau_1}}(\tau_1)\} = \\ &= \{R_1(\tau_1), R_2(\tau_1), \dots, R_{15}(\tau_1)\} = \{R_4(0), R_5(0), \\ &\quad \dots, R_{18}(0)\} = R_{\tau_1}, \quad (12) \end{aligned}$$

где $n_{\tau_1} = n_0 - m_{\tau_1} = 18 - 3 = 15$; $\bar{R}^{(e)}(\tau_1 | R_\tau, T_\tau) = \{R_1^{(e)}(\tau_1), R_2^{(e)}(\tau_1), R_3^{(e)}(\tau_1)\} = \{\bar{R}_1(\tau_1), \bar{R}_2(\tau_1), \bar{R}_3(\tau_1)\} = \{R_1(0), R_2(0), R_3(0)\}$ – набор работ-операций, соответствующий τ_1 -позиции $p^{(e)}(\tau_1)$ и состоящий из трех работ-операций. Тогда, учитывая, что

$R^{(e)}(\tau_1) = \{R_1(\tau_1), R_2(\tau_1), \dots, R_{15}(\tau_1)\} = R_{\tau_1} \neq \emptyset$, то полагается: $s := s + 1$; $t_s := \tau_1$; $p_a^{(e)}(t_s) := p^{(e)}(\tau_1)$ на основе данных, содержащихся в массиве $A(\tau) = \{A_1(\tau), A_2(\tau), \dots, A_{16}(\tau)\} = \{\bar{A}_2(0), A_3(0), \dots, A_{18}(0)\} = A_\tau$, вычисляется соответствующий массиву работ-операций $R^{(e)}(\tau_1) = \{R_1(\tau_1), R_2(\tau_1), \dots, R_{15}(\tau_1)\} = \{R_4(0), R_5(0), \dots, R_{18}(0)\} = R_{\tau_1}$ новый массив длительности исполнения работ-операций $A(\tau_1) = \{A_1(\tau_1), A_2(\tau_1), \dots, A_{15}(\tau_1)\} = \{A_4(0), A_5(0), \dots, A_{18}(0)\} = A_{\tau_1}$, отвечающий новому периоду времени $\tau = \tau_1$; полагается $\tau := \tau_1 = 13$.

Дальнейшая реализация оставшихся для исполнения работ-операций рассматриваемого инвестиционного проекта происходит без задержек.

Тогда на основании предлагаемого метода осуществляется решение новой задачи календарного планирования, отвечающей периоду времени $\tau = 13$ и сформированному набору работ-операций $R^{(e)}(\tau_1) = \{R_1(\tau_1), R_2(\tau_1), \dots, R_{15}(\tau_1)\} = \{R_4(0), R_5(0), \dots, R_{18}(0)\} = R_{\tau_1}$ формируется единственный новый критический путь (рис. 12) рассматриваемого инвестиционного проекта $R^{(kp)}(\tau) = \{R_1^{(kp)}(13; 17), R_2^{(kp)}(17; 19)\} = R_{\tau}^{(kp)}$, который является частью предыдущего критического пути (рис. 9) и состоит из двух работ-операций $\{R_6(\tau), R_{14}(\tau)\} = \{R_6(0), R_{14}(0)\}$, а также новый календарный график,

являющийся частью предыдущего графика, которым соответствует новый массив периодов времени для реализации процесса адаптивного управления $T_\tau = \{\tau_k\}_{k \in I(T_\tau)} = \{\tau_k\}_{k \in 0,2} = \{13; 17; 19\} = \{\tau_0, \tau_1, \tau_2\}$, где $\tau_0 = \tau = 13$.

Далее формируется отвечающая сложившейся ситуации новая τ_1 -позиция ($\tau_1 = 17$) проекта $p(\tau_1) = \{\tau_1, \bar{R}(\tau_1 | R_0, T_\tau)\} \in P(\tau_1)$, где $P(\tau_1)$ – множество всех допустимых τ_1 -позиций, а множество работ-операций $\bar{R}(\tau_1 | R_0, T_\tau) = \{\bar{R}_1(\tau_1), \bar{R}_2(\tau_1), \dots, \bar{R}_{m_{\tau_1}}(\tau_1)\} = \{\bar{R}_1(\tau_1), \bar{R}_2(\tau_1), \dots, \bar{R}_7(\tau_1)\}$, т. е. $m_{\tau_1} = 7 < n_0 = 18$. При этом $p(\tau_1) = \{\tau_1, \{\bar{R}_1(\tau_1), \bar{R}_2(\tau_1), \dots, \bar{R}_7(\tau_1)\}\} = p^{(e)}(\tau_1) = \{\tau_1, \{R_1^{(e)}(\tau_1), R_2^{(e)}(\tau_1), \dots, R_7^{(e)}(\tau_1)\}\} = \{\tau_1, \bar{R}^{(e)}(\tau_1 | R_0, T_\tau)\} \in P(\tau_1)$, т. к. работы из массива $\{\bar{R}_1(\tau_1), \bar{R}_2(\tau_1), \dots, \bar{R}_7(\tau_1)\} = \{R_1(0), R_2(0), R_3(0), R_6(0), R_7(0), R_8(0), R_{10}(0)\}$ есть такие и только такие работы-операции, которые и должны быть выполнены к периоду времени $t = \tau_1 = 17$ – в срок, определенный для них сформированным календарным графиком.

Тогда в соответствии с определенной в предлагаемом методе стратегией оптимального адаптивного управления инвестиционным проектом $U_a^{(e)} \in U_a$ для τ_1 -позиции $p^{(e)}(\tau_1) = \{\tau_1, \bar{R}^{(e)}(\tau_1 | R_0, T_\tau)\} \in P(\tau_1)$, имеем:

$$U_a^{(e)}(p^{(e)}(\tau_1)) = R^{(e)}(\tau_1) = \{R_0 \setminus \bar{R}^{(e)}(\tau_1 | R_0, T_\tau)\} = \{\hat{R}^{(e)}(\tau_1 | R_0, T_\tau) = \{R_1(0), R_2(0), \dots,$$

$$\begin{aligned} & R_{18}(0)\} \setminus \{R_1^{(e)}(\tau_1), R_2^{(e)}(\tau_1), \dots, R_{m_{\tau_1}}^{(e)}(\tau_1)\} = \\ & = \{R_1(0), R_2(0), \dots, R_{18}(0)\} \setminus \{R_1^{(e)}(\tau_1), \\ & R_2^{(e)}(\tau_1), \dots, R_7^{(e)}(\tau_1)\} = \{R_1(0), R_2(0), \dots, \\ & R_{18}(0)\} \setminus \{\bar{R}_1(\tau_1), \bar{R}_2(\tau_1), \dots, \bar{R}_7(\tau_1)\} = \\ & = \{R_1(0), R_2(0), \dots, R_{18}(0)\} \setminus \{R_1(0), R_2(0), \\ & R_3(0), R_6(0), R_7(0), R_8(0), R_{10}(0)\} = \\ & = \{R_4(0), R_5(0), R_9(0), R_{11}(0), R_{12}(0), \dots, R_{18}(0)\} = \\ & = \{\hat{R}_1^{(e)}(\tau_1), \hat{R}_2^{(e)}(\tau_1), \dots, \hat{R}_{n_0-m_{\tau_1}}^{(e)}(\tau_1)\} = \{\hat{R}^{(e)}(\tau_1), \\ & \hat{R}_2^{(e)}(\tau_1), \dots, \hat{R}_{n_{\tau_1}}^{(e)}(\tau_1)\} = \{R_1(\tau_1), R_2(\tau_1), \dots, \\ & R_{n_{\tau_1}}(\tau_1)\} = \{R_1(\tau_1), R_2(\tau_1), \dots, R_{11}(\tau_1)\} = \\ & = \{R_4(0), R_5(0), R_9(0), R_{11}(0), R_{12}(0), \\ & \dots, R_{18}(0)\} = R_{\tau_1}, \quad (13) \end{aligned}$$

где $n_{\tau_1} = n_0 - m_{\tau_1} = 18 - 7 = 11$; $\bar{R}^{(e)}(\tau_1 | R_0, T_\tau) = \{\bar{R}_1^{(e)}(\tau_1), \bar{R}_2^{(e)}(\tau_1), \dots, \bar{R}_7^{(e)}(\tau_1)\} = \{\bar{R}_1(\tau_1), \bar{R}_2(\tau_1), \dots, \bar{R}_7(\tau_1)\} = \{R_1(0), R_2(0), R_3(0), R_6(0), R_7(0), R_8(0), R_{10}(0)\}$ – набор работ-операций, соответствующий τ_1 -позиции $p^{(e)}(\tau_1)$ и состоящий из семи работ-операций. Тогда, учитывая, что $R^{(e)}(\tau_1) = \{R_1(\tau_1), R_2(\tau_1), \dots, R_{11}(\tau_1)\} = R_{\tau_1} \neq \emptyset$, то полагается: $s := s + 1$; $t_s := \tau_1$; $p_a^{(e)}(t_s) := p^{(e)}(\tau_1)$; на основе данных, содержащихся в массиве $A(\tau) = \{A_1(\tau), A_2(\tau), \dots, A_{15}(\tau)\} = A_\tau$ вычисляется соответствующий массиву работ-операций $R^{(e)}(\tau_1) = \{R_1(\tau_1), R_2(\tau_1), \dots, R_{11}(\tau_1)\} = \{R_4(0), R_5(0), R_9(0), R_{11}(0), R_{12}(0), \dots, R_{18}(0)\} = R_{\tau_1}$ новый массив длительности

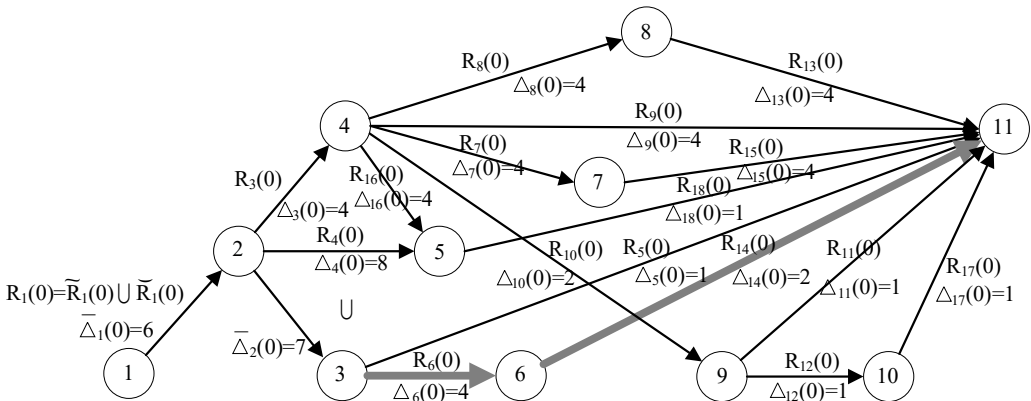


Рис. 9. Критический путь сетевой модели, соответствующий периоду времени $\tau = 13$

исполнения работ-операций $\mathcal{A}(\tau_1) = \{\mathcal{A}_1(\tau_1), \mathcal{A}_2(\tau_1), \dots, \mathcal{A}_{11}(\tau_1)\} = \{\mathcal{A}_4(0), \mathcal{A}_5(0), \mathcal{A}_9(0), \mathcal{A}_{11}(0), \mathcal{A}_{12}(0), \dots, \mathcal{A}_{18}(0)\} = \mathcal{A}_{\tau_1}$, отвечающий новому периоду времени $\tau = \tau_1$; полагается $\tau := \tau_1 = 17$.

Далее на основании предлагаемого метода осуществляется решение новой задачи календарного планирования, отвечающей периоду времени $\tau = 17$ и сформированному набору работ-операций $\mathbf{R}^{(e)}(\tau_1) = \{R_1(\tau_1), R_2(\tau_1), \dots, R_{11}(\tau_1)\} = \{R_4(0), R_5(0), R_9(0), R_{11}(0), R_{12}(0), \dots, R_{18}(0)\} = \mathbf{R}_{\tau_1}$, формируется единственный новый критический путь рассматриваемого инвестиционного проекта $\mathbf{R}^{(кр.)}(\tau) = \{R_2^{(кр.)}(17; 19)\} = \mathbf{R}_{\tau}^{(кр.)}$, который является частью предыдущего критического пути (рис. 9) и состоит из одной работы-операции $\{R_{14}(\tau)\}$, а также новый календарный график, являющийся частью предыдущего графика. Этим элементам решения рассматриваемой задачи инвестиционного проектирования соответствует новый массив периодов времени для реализации процесса адаптивного управления $\mathbf{T}_{\tau} = \{\tau_k\}_{k \in \overline{1, m_{\tau}^{(кр.)}}} = \{\tau_k\}_{k \in \overline{0, 1}} = \{17; 19\} = \{\tau_0, \tau_1\}$, где $\tau_0 = \tau = 17$.

Тогда формируется отвечающая сложившейся ситуации новая τ_1 -позиция ($\tau_1 = 19$) проекта $p(\tau_1) = \{\tau_1, \bar{\mathbf{R}}(\tau_1 | \mathbf{R}_0, \mathbf{T}_{\tau})\} \in \mathbf{P}(\tau_1)$, где $\mathbf{P}(\tau_1)$ – множество всех допустимых τ_1 -позиций, а множество работ-операций $\bar{\mathbf{R}}(\tau_1 | \mathbf{R}_0, \mathbf{T}_{\tau}) = \{\bar{R}_1(\tau_1), \bar{R}_2(\tau_1), \dots, \bar{R}_{m_{\tau_1}}(\tau_1)\} = \{\bar{R}_1(\tau_1), \bar{R}_2(\tau_1), \dots, \bar{R}_{18}(\tau_1)\}$, т. е. $m_{\tau_1} = 18 = n_0 = 18$. При этом $p(\tau_1) = \{\tau_1, \{\bar{R}_1(\tau_1), \bar{R}_2(\tau_1), \dots, \bar{R}_{18}(\tau_1)\}\} = p^{(e)}(\tau_1) = \{\tau_1, \{R_1^{(e)}(\tau_1), R_2^{(e)}(\tau_1), \dots, R_{18}^{(e)}(\tau_1)\}\} = \{\tau_1, \bar{\mathbf{R}}^{(e)}(\tau_1 | \mathbf{R}_0, \mathbf{T}_{\tau})\} \in \mathbf{P}(\tau_1)$, т. к. работы из массива $\{\bar{R}_1(\tau_1), \bar{R}_2(\tau_1), \dots, \bar{R}_{18}(\tau_1)\} = \{R_1(0), R_2(0), \dots, R_{18}(0)\}$ есть такие и только такие работы-операции, которые и должны быть выполнены к периоду времени $t = \tau_1 = 19$ – в срок, определенный для них сформированным календарным графиком.

Далее, в соответствии с определенной в предлагаемом методе стратегией

оптимального адаптивного управления инвестиционным проектом $U_a^{(e)} \in U_a$ для τ_1 -позиции $p^{(e)}(\tau_1) = \{\tau_1, \bar{\mathbf{R}}^{(e)}(\tau_1 | \mathbf{R}_0, \mathbf{T}_{\tau})\} \in \mathbf{P}(\tau_1)$, имеем:

$$\begin{aligned} U_a^{(e)}(p^{(e)}(\tau_1)) &= \mathbf{R}^{(e)}(\tau_1) = \{\mathbf{R}_0 \setminus \bar{\mathbf{R}}^{(e)}(\tau_1 | \mathbf{R}_0, \mathbf{T}_{\tau})\} = \\ &= \hat{\mathbf{R}}^{(e)}(\tau_1 | \mathbf{R}_0, \mathbf{T}_{\tau}) = \{R_1(0), R_2(0), \dots, R_{18}(0)\} \setminus \\ &\setminus \{R_1^{(e)}(\tau_1), R_2^{(e)}(\tau_1), \dots, R_{m_{\tau_1}}^{(e)}(\tau_1)\} = \{R_1(0), R_2(0), \\ &\dots, R_{18}(0)\} \setminus \{R_1^{(e)}(\tau_1), R_2^{(e)}(\tau_1), \dots, R_{18}^{(e)}(\tau_1)\} = \\ &= \{R_1(0), R_2(0), \dots, R_{18}(0)\} \setminus \{\bar{R}_1(\tau_1), \bar{R}_2(\tau_1), \dots, \\ &\bar{R}_{18}(\tau_1)\} = \{R_1(0), R_2(0), \dots, R_{18}(0)\} \setminus \{R_1(0), \\ &R_2(0), \dots, R_{18}(0)\} = \mathbf{R}_{\tau_1} = \emptyset. \quad (14) \end{aligned}$$

В соответствии с определенной в предлагаемом методе стратегией оптимального адаптивного управления инвестиционным проектом $U_a^{(e)} \in U_a$ и учитывая, что $\bar{\mathbf{R}}^{(e)}(\tau_1 | \mathbf{R}_0, \mathbf{T}_{\tau}) = \{R_1^{(e)}(\tau_1), R_2^{(e)}(\tau_1), \dots, R_{18}^{(e)}(\tau_1)\} = \{\bar{R}_1(\tau_1), \bar{R}_2(\tau_1), \dots, \bar{R}_{18}(\tau_1)\} = \{R_1(0), R_2(0), \dots, R_{18}(0)\}$, т. е. $m_{\tau_1} = n_0 = 18$ и $\mathbf{R}^{(e)}(\tau_1) = \mathbf{R}_{\tau_1} = \emptyset$, то получается, что к периоду времени $T_{\tau}^{(e)} = \tau_1 = 19$ реализовались все работы-операции рассматриваемого инвестиционного проекта. Следовательно, процесс оптимизации адаптивного управления, т. е. формирования и реализации стратегии $U_a^{(e)} \in U_a$ считается выполненным, полагается: $s := s + 1$; $t_s := \tau_1 = 19$; $p_a^{(e)}(t_s) := p^{(e)}(\tau_1)$ и осуществляется переход на формирование выходных данных.

Выходные результаты процесса оптимизации адаптивного управления рассматриваемым инвестиционным проектом, т. е. формирования и реализации стратегии $U_a^{(e)} \in U_a$, формируются в соответствии с п. 14 приведенного в первой части статьи описания предлагаемого метода и есть следующие данные: $\mathbf{R}_a^{(e)} = \mathbf{R}(0) = \{R_1(0), R_2(0), \dots, R_{n_0}(0)\} = \mathbf{R}_0 = \{R_1(0), R_2(0), \dots, R_{18}(0)\}$ – исходный набор работ-операций; $\mathbf{WM}_a^{(e)} = \mathbf{WM}_0^{(e)}(\mathbf{R}(0))$ – оптимальная сетевая модель; $p_a^{(e)}(t_k)$ – набор t_k -позиций $k \in \overline{1, s}$, соответствующих реализации стратегии оптимального

адаптивного управления проектом $U_a^{(e)}$; $T_a^{(e)} = T_\tau^{(e)} = T_{17}^{(e)} = 19$ – оптимальное время реализации проекта, соответствующее реализации стратегии оптимального адаптивного управления проектом $U_a^{(e)}$.

Полученные результаты отображаются в форме, удобной для хозяйствующего субъекта (лица, принимающего решения), реализующего процесс оптимизации управления инвестиционным проектом, например в виде таблиц, графиков или диаграмм.

Отметим, что если не применять предложенный метод оптимизации адаптивного управления инвестиционным проектированием, то уже в период времени, отвечающий $\tau = \tau_1 = 4$, когда еще не реализовалась в полном объеме работа-операция $R_1(\tau_1) = \{\tilde{R}_1(\tau_1) \cup \tilde{R}_1(\tau_1)\} = R_1(\tau) = \tilde{R}_1(0)$, а реализовалась только ее часть $\tilde{R}_1(\tau_1)$, осуществление рассматриваемого инвестиционного проекта в соответствии с календарным графиком, разработанным для начального периода времени $\tau = 0$, приведет к пересечению периодов исполнения, входящих в него работ $R_2(\tau_1) = R_2(\tau) = R_2(0)$ и $R_3(\tau_1) = R_3(\tau) = R_3(0)$, что является недопустимым из условий его реализации и приведет к неисполнению проекта в целом.

Таким образом, из полученных результатов решения модельной задачи инвестиционного проектирования можно сделать общий вывод, что применение предлагаемого нового метода оптимизации адаптивного управления процессами инвестиционного проектирования позволяет осуществить обратную связь в форме соответствующих реакций управляющего воздействия на непредвиденные изменения ситуаций при его реализации и получить оптимальный результат – оптимальное время для исполнения инвестиционного проекта в целом.

5. Основные выводы

Важной особенностью предлагаемого нового формализованного

экономико-математического метода формирования стратегии оптимального адаптивного управления инвестиционным проектированием является то, что он учитывает возможность управления по принципу обратной связи на основе реальных данных о состоянии реализации соответствующих процессов. Данные, получаемые хозяйствующим субъектом по ходу реализации инвестиционного проекта, последовательно используются для формирования стратегии оптимального адаптивного управления.

Применение адаптивных принципов построения модели оптимизации управления процессами инвестиционного проектирования позволяют существенно снизить влияние неопределенности на качество результатов управления, компенсируя недостаток априорной информации на этапе проектирования.

Рассмотренная в статье модельная задача оптимизации адаптивного управления инвестиционным проектированием призвана раскрыть насущные проблемы управления комплексами работ в одной из важных сфер национальной экономики – сфере ресторанного бизнеса. Несомненно, что инвесторы, менеджеры, аналитики, инженеры, предприниматели, плановики и вообще все лица и группы лиц, несущие ответственность за разработку и контроль реализации конкретных инвестиционных проектов, смогут оценить значительные преимущества возможностей оптимального адаптивного сетевого моделирования, по сравнению с другими моделями управления.

На основе предложенного в данной статье нового метода оптимизации адаптивного управления инвестиционным проектированием разработаны соответствующие численные методы и создан программный комплекс, позволяющий реализовать компьютерное моделирование решения рассматриваемой задачи. Данный комплекс может использоваться

в качестве инструментального средства для поддержки принятия управленческих решений при практической реализации инвестиционного проектирования хозяйствующими субъектами.

Дальнейшее развитие методов сетевого моделирования и календарного планирования для процессов инвестиционного проектирования и создания на их основе моделей оптимизации адаптивного управления может быть направлено на разработку и создание инструментальных средств, поддерживающих принятие управленческих решений в данной сфере деятельности. Компьютерная интеллектуальная

система поддержки принятия решений для оптимизации адаптивного управления процессами инвестиционного анализа и проектирования может быть разработана, например, с помощью технологий экспертных систем и моделирования знаний на основе продукционных правил и нейронных сетей или моделей машинного обучения. Применение интеллектуальной компьютерной системы позволит хозяйствующему субъекту иметь в распоряжении эффективный инструментарий для оценки возможностей реализации различных производственных и коммерческих инвестиционных проектов.

Список использованных источников

1. Математика и кибернетика в экономике: словарь-справочник. М.: Экономика, 1975. 704 с.
2. Карев В. П. Математическое моделирование бизнеса – оценка, инвестиционное проектирование, управление предприятием. М.: Маросейка, 2010. 347 с.
3. Срагович В. Г. Адаптивное управление. М.: Наука, 1981. 384 с.
4. Карпов Л. Е., Юдин В. Н. Адаптивное управление по прецедентам, основанное на классификации состояний управляемых объектов // Труды Института системного программирования РАН. 1996. С. 37–57.
5. Шугина А. А., Ступина А. А. Адаптивная модель управления технологическим процессом в условиях неопределенности // Современные наукоемкие технологии. 2017. № 5. С. 83–88 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://top-technologies.ru/ru/article/view?id=36673> (дата обращения: 13.08.2019).
6. Комаева Л. Э. Адаптивные организационные структуры управления предприятиями в нестабильной среде хозяйствования. М.: Инфра-М, 2017. 200 с.
7. Рыжкина Т. А. Построение адаптивной модели контроля стохастического процесса // Научные труды Дальрыбвтуза. 2019. Т. 47, № 1. С. 49–56.
8. Кормен Т., Лейзерсон Ч., Ривест Р., Штайн К. Алгоритмы: построение и анализ / пер. с англ. 2-е изд. М.: Вильямс, 2011. 1 296 с.
9. Кофман А., Дебазей Г. Сетевые методы планирования и их применение. М.: Прогресс, 1968. 182 с.
10. Таха Хемди А. Введение в исследование операций / 7-е изд. ; пер. с англ. М.: Изд. дом «Вильямс», 2005. 912 с.
11. Скурихин В. И., Забродский В. А., Конейченко Ю. В. Проектирование систем адаптивного управления производством. Харьков: Изд. Вища школа, 1984. 206 с.
12. Харари Ф. Теория графов. М.: УРСС, 2003. 300 с.
13. Емельянов А. А., Булыгина О. В., Халин В. Г. Экономико-имитационное моделирование с элементами искусственного интеллекта. М.: Неолит, 2018. 160 с.
14. Емельянов А. А., Власова Е. А., Емельянова Н. З., Прокимнов Н. Н. Имитационное моделирование инвестиционных процессов // Прикладная информатика. 2012. № 2 (38). С. 93–99.
15. Чертовской В. Д. Информационная поддержка адаптивного автоматизированного управления производством // Прикладная информатика. 2013. № 1 (43). С. 11–17.
16. Шориков А. Ф. Минимаксное оценивание и управление в дискретных динамических системах. Екатеринбург: Изд-во Урал. гос. ун-та, 1997. 242 с.

17. Шориков А. Ф., Буценко Е. В. Построение сетевой экономико-математической модели для реализации процесса оптимизации инвестиционного проектирования // Прикладная информатика. Научно-практический журнал. Изд-во «МФПУ «Синергия». 2015. Т. 10, № 2(56). С. 80–91.

18. Шориков А. Ф., Буценко Е. В. Прогнозирование и оптимизация результата управления инвестиционным проектированием. М.: URSS-ЛЕНАНД, 2017. 272 с.

19. Aksyonov K., Bykov E., Aksyonova O., Goncharova N., Nevolina A. Analysis of Simulation Modeling Systems Illustrated with the Problem of Model Design for the Subject of Technological Logistics (WIP) // Society for Modeling & Simulation International (SCS). 2015 Summer Simulation Multi-Conference (SummerSim'15). Simulation Series. 2015. Vol. 47, Issue 10. Pp. 345–348.

20. Aksyonov K., Antonova A., Goncharova N. Choice of the Scheduling Technique Taking into Account the Subcontracting Optimization // Advances in Signal Processing and Intelligent Recognition Systems. SIRS2017. Advances in Intelligent Systems and Computing / edited by S. M. Thampi, S. Krishnan, J. M. Corchado Rodriguez, S. Das, M. Wozniak, D. Al-Jumeily. Vol. 678. Springer, Cham., 2018. Pp. 297–304. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-67934-1_26.

21. Astolfi A. Nonlinear and Adaptive Control, Tools and Algorithms for the User. London: Imperial College Press, 2006. 313 p.

22. Astroem K. J., Wittenmark B. Adaptive Control. 2nd edition. Dover Publications, 2008. 590 p.

23. Artificial Intelligence Techniques / Edited by A. Bundy. Springer Verlag, 1997.

24. Farrell J. A., Polycarpou M. M. Adaptive Approximation Based Control. Unifying Neural, Fuzzy and Traditional Adaptive Approximation Approaches. John Wiley, 2006. 432 p.

25. Landau I. D., Lozano R., M'Saad M., Karimi A. Adaptive Control: Algorithms, Analysis and Applications. London: Springer, 2011. 610 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Шориков Андрей Федорович

Доктор физико-математических наук, профессор кафедры прикладной математики Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия (620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19); ORCID 0000-0003-1255-0862; e-mail: afshorikov@mail.ru.

Буценко Елена Владимировна

Кандидат экономических наук, доцент кафедры бизнес-информатики Уральского государственного экономического университета, г. Екатеринбург, Россия (620144, г. Екатеринбург, ул. 8 Марта, 62); ORCID 0000-0003-2747-5391; e-mail: evl@usue.ru.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 18-01-00544 «Задачи достижимости, управления, оценивания в динамических системах с импульсным управлением и неопределенностью».

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ

Шориков А. Ф., Буценко Е. В. Метод сетевого экономико-математического моделирования оптимизации адаптивного управления инвестиционным проектированием // Journal of Applied Economic Research. 2020. Т. 19, № 1. С. 97–124. DOI: 10.15826/vestnik.2020.19.1.006.

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

Дата поступления 19 ноября 2019 г.; дата поступления после рецензирования 28 января 2020 г.; дата принятия к печати 20 февраля 2020 г.

Method of Network Economic-Mathematical Modeling of Adaptive Control Optimization Investment Projecting

A. F. Shorikov¹ ✉, E. V. Butsenko² 

¹Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin,
Ekaterinburg, Russia

²Urals State University of Economics, Ekaterinburg, Russia

✉ afshorikov@mail.ru

Abstract. For successful activity of any business entity in the field of investment projecting, it is necessary to have modern tools for managing its processes. The article discusses the process of optimizing adaptive control of investment projects for an economic entity with the possibility of introducing feedback. The value of the length of time for the execution of the investment project as a whole, which needs to be minimized, is considered as the objective function (evaluation functional) in the optimization problem under study. To solve this problem, a new method of network economic and mathematical modeling of the optimization of adaptive management of investment projecting is proposed. The proposed method allows you to create a class of acceptable strategies for adaptive control (feedback control) of the implementation process for the investment project under consideration. Within the framework of this class of strategies, an optimal adaptive management strategy for the implementation of the investment project is formed, the optimal time for its implementation and the optimal schedule for the project as a whole, corresponding to the optimal adaptive control strategy, are calculated. The paper describes a new optimization network economic and mathematical model that takes into account the possibility of adaptive control of the implementation of the investment project under consideration, and proposes a new method for solving this problem. The practical implementation of the considered solution method was carried out on a specific example of investment projecting. The results obtained in the work show a high degree of effectiveness of the method used. Further development of this direction may be associated with the development of a computer model of the processes for implementing investment projects and the creation of decision support systems for control their implementation.

Key words: adaptive control; network model; investment project; economic and mathematical modeling; investment optimization; control strategy; calendar schedule.

JEL C61

References

1. *Matematika i kibernetika v ekonomike [Mathematics and cybernetics in economics]* (1975). Moscow, Ekonomika. (In Russ.).
2. Karev, V.P. (2010). *Matematicheskoe modelirovanie biznesa – otsenka, investitsionnoe proektirovanie, upravlenie predpriatiem [Mathematical modelling of business: valuation, investment project planning, corporate management]*. Moscow, Maroseika. (In Russ.).
3. Sragovich, V.G. (1981). *Adaptivnoe upravlenie [Adaptive management]*. Moscow, Nauka. (In Russ.).
4. Karpov, L.E., Yudin, V.N. (2007). Adaptivnoe upravlenie po pretsedentam, osnovannoe na klassifikatsii sostoianii upravlyaemykh ob'ektov (Adaptive management on precedents, based on the classification of the states of managed objects). *Trudy Instituta sistemnogo programmirovaniia RAN [Proceedings of the Institute for System Programming]*, Vol. 13, Issue 2, 37–57. (In Russ.).

5. Shigina, A.A., Stupina, A.A. (2017). Adaptivnaia model upravleniia tekhnologicheskim protsessom v usloviakh neopredelennosti (Adaptive Model Of Process Control Under Incomplete Information). *Sovremennye naukoemkie tekhnologii [Modern High Technologies]*, No. 5, 83–88. Available at: <http://top-technologies.ru/ru/article/view?id=36673> (Last accessed: 13.08.2019). (In Russ.).
6. Komaeva, L.E. (2017). *Adaptivnye organizatsionnye struktury upravleniia predpriiatiami v nestabil'noi srede khoziaistvovaniia [Adaptive organizational structures for corporate management in an unstable economic environment]*. Moscow, Infra-M. (In Russ.).
7. Ryzhkina, T.A. (2019). Postroenie adaptivnoi modeli kontroliia stokhasticheskogo protsessa (Construction of adaptive model of control of the stochastic process). *Nauchnye trudy Dalrybvtuza [Scientific Journal of Dalrybvtuz]*, Vol. 47, No. 1, 49–56. (In Russ.).
8. Cormen, T.H., Leiserson, C.E., Rivest, R., Stein, C. (1989). *Introduction to Algorithms*. MIT Press.
9. Kaufmann A., Desbazeille, G. (1966). *La methode du chemin critique*. Dunod.
10. Taha, H.A. (2002). *Operations Research: An Introduction*. Prentice Hall.
11. Skurikhin, V.I., Zabrodsky, V.A., Kopeichenko, Iu.V. (1984). *Proektirovanie sistem adaptivnogo upravleniia proizvodstvom [Design of adaptive production management systems]*. Kharkiv, Vishcha shkola. (In Russ.).
12. Harary, F. (1971). *Graph Theory*. Addison-Wesley.
13. Emelyanov, A.A., Bulygina, O.V., Khalin, V.G. (2018). *Ekonomiko-imitatsionnoe modelirovanie s elementami iskusstvennogo intellekta [Economic imitational modelling with elements of artificial intelligence]*. Moscow, Neolit. (In Russ.).
14. Emelyanov, A.A., Vlasova, E.A., Emelyanova, N.Z., Prokimnov, N.N. (2012). Imitatsionnoe modelirovanie investitsionnykh protsessov (Simulating investment processes). *Prikladnaia informatika [Applied Informatics]*, No. 2 (38), 93–99. (In Russ.).
15. Chertovskoy, V.D. (2013). Informatsionnaia podderzhka adaptivnogo avtomatizirovannogo upravleniia proizvodstvom (Information support for adaptive automated production management). *Prikladnaia informatika [Applied Informatics]*, No. 1 (43), 11–17. (In Russ.).
16. Shorikov, A.F. (1997). *Minimaksnoe otsenivanie i upravlenie v diskretnykh dinamicheskikh sistemakh [Minimax estimation and management in discrete dynamical systems]*. Ekaterinburg, Urals State University. (In Russ.).
17. Shorikov, A.F., Butsenko, E.V. (2015). Postroenie setevoi ekonomiko-matematicheskoi modeli dlia realizatsii protsessa optimizatsii investitsionnogo proektirovaniia (Building a network of economic-mathematical model for the implementation of the optimization process of investment projecting). *Prikladnaia informatika [Applied Informatics]*, Vol. 10, No. 2(56), 80–91. (In Russ.).
18. Shorikov, A.F., Butsenko, E.V. (2017). *Prognozirovanie i optimizatsiia rezul'tata upravleniia investitsionnym proektirovaniiem [Forecasting and optimization of results of investment design management]*. Moscow, URSS-LENAND. (In Russ.).
19. Aksyonov, K., Bykov, E., Aksyonova, O., Goncharova, N., Nevolina, A. (2015). Analysis of Simulation Modeling Systems Illustrated with the Problem of Model Design for the Subject of Technological Logistics (WIP). *Society for Modeling & Simulation International (SCS). 2015 Summer Simulation Multi-Conference (SummerSim'15). Simulation Series*, Vol. 47, Issue 10, 345–348.
20. Aksyonov, K., Antonova, A., Goncharova, N. (2018). Choice of the Scheduling Technique Taking into Account the Subcontracting Optimization. *Advances in Signal Processing and Intelligent Recognition Systems. SIRS2017. Advances in Intelligent Systems and Computing*. Edited by S.M. Thampi, S. Krishnan, J.M. Corchado Rodriguez, S. Das, M. Wozniak, D. Al-Jumeily, Vol 678. Springer, Cham., 297–304. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-67934-1_26.
21. Astolfi, A. (2006). *Nonlinear and Adaptive Control, Tools and Algorithms for the User*. London, Imperial College Press, 313 p.
22. Astrom, K.J., Wittenmark, B. (2008). *Adaptive Control*. 2nd edition. Dover Publications, 590 p.
23. *Artificial Intelligence Techniques (1997)*. Edited by A. Bundy. Springer Verlag.

24. Farrell, J.A., Polycarpou, M.M. (2006). *Adaptive Approximation Based Control. Unifying Neural, Fuzzy and Traditional Adaptive Approximation Approaches*. John Wiley, 432 p.
25. Landau, I.D., Lozano, R., M'Saad, M., Karimi, A. (2011). *Adaptive Control: Algorithms, Analysis and Applications*. London, Springer, 610 p.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Shorikov Andrey Fyodorovich

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Department of Applied Mathematics, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia (620002, Ekaterinburg, Mira street, 19); ORCID 0000-0003-1255-0862; e-mail: afshorikov@mail.ru.

Butsenko Elena Vladimirovna

Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Department of Business Informatics, Ural State University of Economics, Ekaterinburg, Russia (620144, Ekaterinburg, 8 March street, 62); ORCID 0000-0003-2747-5391; e-mail: evl@usue.ru.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by the Russian Basic Research Foundation, project No. 18-01-00544 «Problems of attainability, control, estimation in dynamical systems with impulse control and uncertainty».

FOR CITATION

Shorikov A. F., Butsenko E. V. Method of Network Economic-Mathematical Modeling of Adaptive Control Optimization Investment Projecting. *Journal of Applied Economic Research*, 2020, Vol. 19, No. 1, 97–124. DOI: 10.15826/vestnik.2020.19.1.006

ARTICLE INFO

Received November 19, 2019; Revised January 28, 2020; Accepted February 20, 2020.

