
**МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ
ЭКОНОМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ**

**Сетевое экономико-математическое моделирование оптимизации адаптивного
управления процессами бизнес-планирования**

© 2021 г. А.Ф. Шориков, Е.В. Буценко

А.Ф. Шориков,

*Институт экономики УрО РАН, Институт математики и механики им. Н.Н. Красовского
УрО РАН, Екатеринбург; e-mail: afshorikov@mail.ru*

Е.В. Буценко,

Уральский государственный экономический университет, Екатеринбург; e-mail: evl@usue.ru

Поступила в редакцию 23.11.2020

Работа выполнена в соответствии с планами НИР Института экономики УрО РАН и Института математики и механики им. Н.Н. Красовского УрО РАН.

Аннотация. Статья посвящена вопросам применения экономико-математических моделей управления бизнес-планированием на основе использования принципа обратной связи. В качестве целевой функции (оценочного инструментария) задачи рассматривается значение времени исполнения всего бизнес-проекта, которое требуется минимизировать. Для решения поставленной задачи предлагается сформировать класс допустимых стратегий оптимального адаптивного управления процессом реализации конкретного бизнес-проекта с сетевого экономико-математического моделирования. В пределах этих стратегий определяются способ достижения оптимального самонастраивающегося управления процессами бизнес-планирования, оптимальное время исполнения и оптимальный календарный план-график осуществления проекта. Основной особенностью предлагаемого нового метода является возможность учета реальных условий реализации работ для конкретного проекта, что позволяет своевременно корректировать процесс управления процессами бизнес-планирования и не допустить срывов при их выполнении. Данный метод служит основой для построения численных алгоритмов для разработки и создания автоматизированных систем оптимизации адаптивного управления процессами бизнес-планирования. Полученные результаты иллюстрируются на конкретном бизнес-проекте открытия предприятия общественного питания и показывают высокую степень эффективности использования предлагаемого метода.

Ключевые слова: бизнес-планирование, бизнес-проект, экономико-математическое моделирование, стратегия управления, сетевая модель, оптимизация управления, адаптивное управление, управление с обратной связью, общественное питание.

Классификация JEL: C02, C44, G31.

DOI: 10.31857/S042473880016413-3

ВВЕДЕНИЕ

При решении задач сбора и обработки информации существует необходимость в преодолении априорной неопределенности. Эффективный путь решения указанной проблемы — *адаптивные системы*, которые широко используются в биомедицинской электронике, проектировании механических систем, навигации, связи, сейсмологии, радио- и гидролокации и др., а также при изучении социальных, экономических, биологических и других видов систем. Структурная схема адаптивной модели для системы управления в технической сфере представлена на рис. 1.

Для многих современных объектов управления сложно разработать соответствующие им математические модели, приемлемые для исследования. Это связано прежде всего с отсутствием необходимых исходных данных либо непредсказуемым в процессе функционирования объекта изменением. Приспособление объекта управления к изменяющимся внешним и внутренним условиям можно рассматривать как адаптацию. Реализация этого принципа в системах управления позволяет значительно повысить их эффективность в достижении поставленных целей.

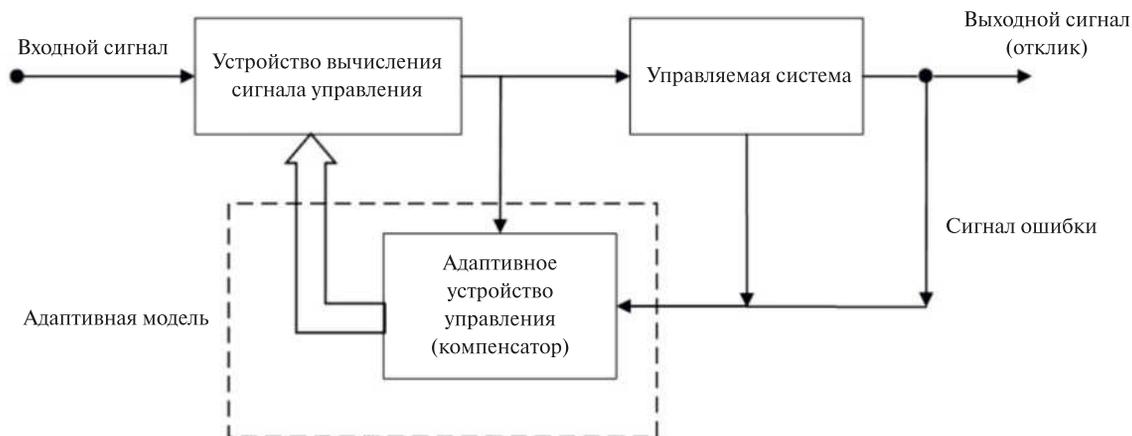


Рис. 1. Структурная схема модели адаптивного управления техническими системами

ТЕОРИЯ АДАПТИВНЫХ СИСТЕМ

Первые работы по адаптивным системам и описанию механизма приспособления и перестройки живых систем появились в середине 1950-х годов. Тогда впервые была описана модель мозга человека, которую представил английский психиатр У.Р. Эшби. Разработку модели осуществил американский ученый Х.С. Цзянь, занимавшийся оптимизацией управления инженерными системами (Tsien, Serdengecti, 1955, p. 561). Приблизительно в это же время описание управляющего устройства адаптивного характера дали А.Н. Беннер и Р. Дренник (Benner, Drenick, 1955, p. 8).

Описанию адаптивных систем оптимального, или экстремального, типа, осуществляющим поиск некоторого оптимума, в научной литературе уделяется больше внимания, чем системам других типов (Deng, Chen, 2017; Moustakis, Yuan, Baldi, 2018; Su, Zhang, 2019). Принципы оптимального управления и экстремальной адаптации в инженерных системах были рассмотрены, например, в (Dzrger, Li, 1951, p. 160).

Любое предприятие как хозяйствующий субъект также можно рассматривать как систему с непредсказуемыми возмущениями и, соответственно, как объект управления. Поэтому адаптивные модели в сфере экономики предназначены для работы с изменяющимися условиями окружающей среды, для адаптации к ним и реализации намеченных целей хозяйствования.

Разработка и реализация адаптивных моделей управления экономическими процессами становится особенно актуальной в условиях возрастания динамики и структурной перестройки экономики. Такие процессы очень сложно поддаются адаптивному управлению из-за постоянно меняющихся во времени свойств (рис. 2). Различные факторы воздействуют на их элементы и в разное время, что приводит к ослаблению влияния одних факторов и увеличению — других. Поэтому такие процессы должны адаптироваться к новым условиям с помощью разработки соответствующих адаптивных систем управления на базе экономико-математических моделей.

Использование небольших дискретных сдвигов в таких моделях приводит к изменению и перестройке системы. Если наблюдаемый процесс находится в некотором исходном состоянии, то при построении его сетевой экономико-математической модели на основе определения текущих значений параметров определяется календарный план на один период времени вперед. После чего формируется оценка сдвига фактического значения параметров от плановых значений, что позволяет осуществить их оптимальную корректировку. Затем устанавливается календарный план на следующий шаг. Рекуррентная процедура повторяется с использованием на каждом шаге новой информации о текущем состоянии исследуемого процесса, что способствует адаптации его управления.

Несмотря на острую теоретическую и практическую востребованность в развитых зарубежных экономиках и в нашей стране, решение данной задачи управления бизнес-планированием на основе адаптивного сетевого экономико-математического моделирования не проводилось ни у нас, ни за рубежом. Таким образом, построение адаптивной сетевой экономико-математической



Рис. 2. Схема управления с обратной связью в экономике

модели оптимизации управления процессами бизнес-планирования для субъекта хозяйствования, а также ее прикладное применение является *целью настоящего исследования*.

Полученные в работе результаты опираются на исследования (Ахмадеев, Макаров, 2019, с. 6; Клейнер, Рыбачук, 2017; Кофман, Дебазей, 1968, с. 87; Чертовской, 2013, с. 11; Agulhari, Lacerda, 2019; Astolfi, 2006, p. 213; Astroem, Wittenmark, 2008, p. 403; Varabanov, Ortega, 2018; Benosman, 2018; Bundy, 1997, p. 82; Farrell, Polycarpou, 2006, p. 330; Huang, Gao, Jiang, 2019; Landau et al., 2011, p. 412; Latrech, Kchaou, Guéguen, 2018; Ма, 2019) и являются развитием работ (Шориков, 1997, p. 78; Шориков, Буценко, 2017, p. 223; Шориков, Буценко, 2020).

МЕТОДЫ И ПОДХОДЫ

Общая методика неадаптивного сетевого экономико-математического управления процессами бизнес-планирования приведена в (Шориков, Буценко, 2017, с. 223). Метод оптимизации адаптивного управления инвестиционным проектированием на основе сетевой модели подробно рассмотрен в работе (Шориков, Буценко, 2020). Задача состоит в оптимизации времени реализации процессов бизнес-планирования на основе знания реализации текущего состояния исполнения этих процессов с использованием управления с обратной связью. Все рассматриваемые процессы описаны в виде конечного набора работ-операций, упорядоченных по времени, в которых учтены необходимые для выполнения технологические условия.

Суть метода можно описать следующим образом. Осуществляется сетевое экономико-математическое моделирование конкретного бизнес-проекта. На основе значений его параметров формируются бизнес-план и календарный график реализации процессов бизнес-планирования, описываемых соответствующими работами, а также множество допустимых позиций (состояний) процессов бизнес-планирования, соответствующих допустимым периодам управления, определяемым работами критического пути, и множество всех допустимых стратегий адаптивного управления процессами бизнес-планирования. На каждом шаге реализации управления процессами, которые определяются работами соответствующего критического пути, в соответствии с правилами формирования стратегии оптимального адаптивного управления бизнес-планированием, осуществляется оценка качества фактической реализации входящих в него работ на основе предписанной длительности их исполнения и данных календарного графика. Затем производится оценка фактических реализаций параметров состояния системы. Если имеется отклонение фактических значений параметров от их плановых значений, то осуществляется корректировка параметров модели с целью ее оптимизации по времени, необходимому для реализации бизнес-проекта в целом. Далее формируются новый критический путь и новый календарный график на следующий период времени, и такая рекуррентная процедура оптимизации адаптивного управления процессами бизнес-планирования повторяется до реализации бизнес-проекта в целом.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Рассмотрим применение сетевой оптимизации адаптивного управления бизнес-планированием на основе модели реализации конкретного бизнес-проекта по открытию кафе-бара.

Бизнес-план реализации этого проекта разработан в соответствии с рекомендациями UNIDO. Назначение бизнес-плана состоит в анализе экономической полезности путем расчета технико-экономических параметров проекта. Концепция проекта кафе-бара предполагает его организацию в торговом центре любого крупного города России или streetretail с высокой проходимостью.

На первом этапе осуществляется формирование исходных данных укрупненных этапов пронумерованных работ-операций бизнес-плана, которые представлены в таблице.

Для каждой работы указаны длительность исполнения и все работы, предшествующие ей. В период $\tau=0$, соответствующий событию 1, формируются начальный массив работ $\mathbf{R}(0)=\{R_1(0), \dots, R_{n_0}(0)\}=\{R_1(0), \dots, R_{38}(0)\}=\mathbf{R}_0$ ($n_0=38$) и отвечающий ему массив длительности исполнения работ $\Delta(0)=\{\Delta_1(0), \dots, \Delta_{38}(0)\}=\Delta_0$.

На втором этапе в соответствии с методом (Шориков, Буценко, 2020) и известными правилами построения сетевой модели осуществляется формирование сетевой модели реализации бизнес-планирования проекта и значениям параметров $t:=0$ и $s=0$. Тем самым строится сетевая модель проекта $\mathbf{WM}_\tau^{(e)}(\mathbf{R}(\tau))=\mathbf{WM}_0^{(e)}(\mathbf{R}(0))\in\mathbf{WM}_0(\mathbf{R}(0))$ в виде сетевого графика (рис. 3). Она соответствует массиву работ $\mathbf{R}(\tau)=\{R_1(\tau), \dots, R_{n_\tau}(\tau)\}=\{R_1(0), \dots, R_{38}(0)\}=\mathbf{R}_0$, массиву длительности $\Delta(\tau)=\{\Delta_1(\tau), \dots, \Delta_{n_\tau}(\tau)\}=\Delta_\tau=\Delta(0)=\{\Delta_1(0), \dots, \Delta_{38}(0)\}=\Delta_0$, а также существующим логическим условиям следования для всех работ бизнес-плана. Событие 1 является начальным событием в этой сети, событие 27 — финальным.

Таблица. Исходные данные бизнес-проекта

Обозначение работы	Содержание работы	Длительность работы, недель	Предшествующие работы
Регистрация и лицензирование			
$R_1(0)$	Регистрация юридического лица	3	—
$R_2(0)$	Подготовка документов для открытия	1	$R_1(0)$
$R_3(0)$	Оформление разрешения Роспотребнадзора	4	$R_1(0), R_2(0)$
$R_4(0)$	Оформление лицензии на алкоголь	4	$R_1(0), R_3(0)$
$R_5(0)$	Выполнение требований ГПС МЧС	2	$R_1(0), R_2(0)$
$R_6(0)$	Регистрация вывески	2	$R_2(0)$
$R_7(0)$	Регистрация ККМ	4	$R_1(0), R_2(0)$
Маркетинговый обзор рынка			
$R_8(0)$	Определение ключевых макроэкономических показателей	1	$R_2(0)$
$R_9(0)$	Обзор рынка общественного питания России	1	$R_2(0)$
$R_{10}(0)$	Анализ рынка общественного питания города	1	$R_2(0)$
$R_{11}(0)$	Обзор потребительских предпочтений	2	$R_2(0)$
$R_{12}(0)$	Формирование стратегии маркетинга	1	$R_{10}(0)$
Производственный план			
$R_{13}(0)$	Определение концепции кафе-бара	1	$R_2(0), R_{11}(0)$
$R_{14}(0)$	Определение структуры площадей	1	$R_2(0), R_{13}(0)$
$R_{15}(0)$	Определение рекомендаций по месторасположению	1	$R_{13}(0)$
$R_{16}(0)$	Определение параметров загрузки	1	$R_{12}(0), R_{15}(0)$
$R_{17}(0)$	Определение динамики загрузки	1	$R_{16}(0)$
$R_{18}(0)$	Определение плана доходов по проекту	1	$R_{12}(0), R_{16}(0)$
$R_{19}(0)$	Определение параметров текущих затрат	1	$R_{16}(0)$
$R_{20}(0)$	Определение плана текущих затрат	1	$R_{12}(0)$
$R_{21}(0)$	Определение параметров прямых затрат	1	$R_{12}(0), R_{13}(0)$
$R_{22}(0)$	Определение плана прямых затрат	1	$R_{12}(0)$

Окончание таблицы

Обозначение работы	Содержание работы	Длительность работы, недель	Предшествующие работы
$R_{23}(0)$	Определение структуры меню	1	$R_{13}(0)$
$R_{24}(0)$	Определение технологического оборудования	2	$R_{12}(0), R_{13}(0)$
$R_{25}(0)$	Автоматизация кафе-бара	2	$R_{13}(0)$
Персонал кафе-бара			
$R_{26}(0)$	Определение потребности в персонале и фонда оплаты труда	2	$R_{13}(0)$
Инвестиционный план			
$R_{27}(0)$	Определение структуры и объема необходимых инвестиций	1	$R_6(0), R_7(0), R_{22}(0), R_{23}(0)$
$R_{28}(0)$	Определение календарного плана финансирования и реализации проекта	1	$R_{27}(0)$
$R_{29}(0)$	Определение рекомендуемых условий привлечения инвестиций	1	$R_{12}(0), R_{27}(0)$
Оценка рисков и путей их сокращения			
$R_{30}(0)$	Качественный анализ рисков	2	$R_{27}(0)$
$R_{31}(0)$	Определение точки безубыточности	1	$R_{18}(0), R_{22}(0)$
$R_{32}(0)$	Анализ чувствительности NPV	1	$R_{30}(0)$
Финансовый план проекта			
$R_{33}(0)$	Определение основных предположений к расчетам	1	$R_{30}(0)$
$R_{34}(0)$	Определение плана движения денежных средств (cashflow)	1	$R_{28}(0)$
$R_{35}(0)$	Определение плана прибылей и убытков	1	$R_{33}(0)$
$R_{36}(0)$	Определение налогообложения	1	$R_{35}(0)$
$R_{37}(0)$	Прогноз доходов кредитора	1	$R_{35}(0)$
$R_{38}(0)$	Прогноз доходов владельца проекта	1	$R_{37}(0)$

В результате построения сетевой модели проекта получены несколько вариантов допустимой для реализации сети (рис. 3, 4), где символами $F_i(0)$, $i \in 1, \dots, 16$, отмечены фиктивные работы, не имеющие затрат времени и ресурсов. Для дальнейших действий выбрана сеть бизнес-плана на рис. 3.

На третьем этапе для сформированной сетевой модели осуществляется оптимизация адаптивного управления. Исходя из начального массива работ $\mathbf{R}(\tau) = \{R_1(\tau), \dots, R_{n_t}(\tau)\} = \{R_1(0), \dots, R_{38}(0)\} = \mathbf{R}_0$, массива длительности $\Delta(\tau) = \{\Delta_1(\tau), \dots, \Delta_{n_t}(\tau)\} = \Delta_1(0), \dots, \Delta_{38}(0) = \Delta_0$ и сетевой модели бизнес-плана, требуется оптимизировать сетевую модель по времени, т.е. решить задачу календарного планирования на основе стандартных расчетов (Шориков, Буценко, 2017, с. 233).

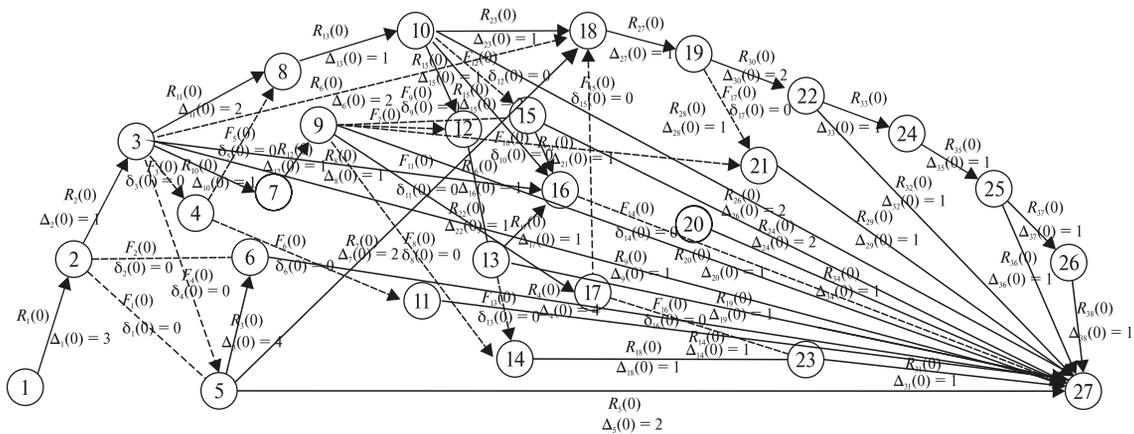


Рис. 3. Принятая к выполнению сетевая модель реализации процессов бизнес-планирования

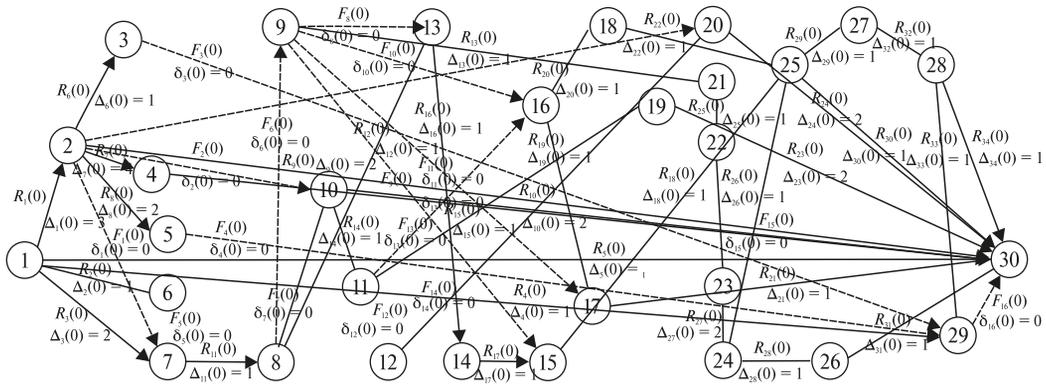


Рис. 4. Допустимая сетевая модель реализации процессов бизнес-планирования

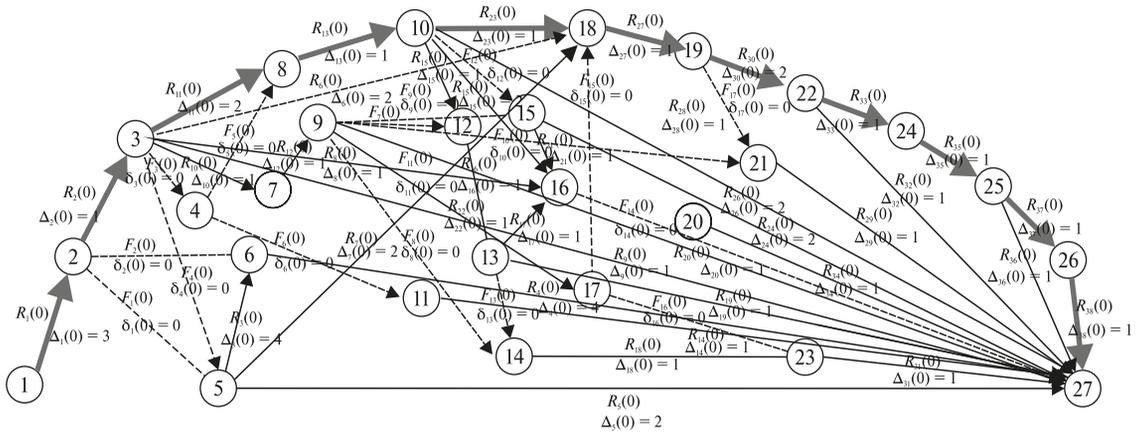


Рис. 5. Критический путь в сетевой модели реализации бизнес-планирования, соответствующий периоду времени $\tau = 0$ (критический путь выделен серым цветом и полужирными линиями)

Для построенной сетевой модели имеется единственный критический путь (рис. 5) длительностью 15 недель, состоящий из набора $\{R_1(\tau), R_2(\tau), R_{11}(\tau), R_{13}(\tau), R_{23}(\tau), R_{27}(\tau), R_{30}(\tau), R_{33}(\tau), R_{35}(\tau), R_{37}(\tau), R_{38}(\tau)\} = \{R_1(0), R_2(0), R_{11}(0), R_{13}(0), R_{23}(0), R_{27}(0), R_{30}(0), R_{33}(0), R_{35}(0), R_{37}(0), R_{38}(0)\}$. Критический путь описывается набором критических работ-операций

$$\mathbf{R}^{(cr)}(\tau) = \{R_1^{(cr.)}(\tau; \tau_1), \dots, R_{n_\tau^{(cr.)}}^{(cr.)}(\tau; \tau_{n_\tau^{(cr.)}-1}; \tau_{n_\tau^{(cr.)}})\} = \mathbf{R}_\tau^{(cr.)} = \{R_1^{(cr.)}(0; 3), R_2^{(cr.)}(3; 4), R_3^{(cr.)}(4; 6), R_4^{(cr.)}(6; 7), R_5^{(cr.)}(7; 8), R_6^{(cr.)}(8; 9), R_7^{(cr.)}(9; 11), R_8^{(cr.)}(11; 12), R_9^{(cr.)}(12; 13), R_{10}^{(cr.)}(13; 14), R_{11}^{(cr.)}(14; 15)\} = R^{(cr.)}(0) = R_9^{(cr.)}(12; 13), R_{10}^{(cr.)}(13; 14), R_{11}^{(cr.)}(14; 15)\} = \mathbf{R}^{(cr.)}(0) = \mathbf{R}_0^{(cr.)}, n_\tau^{(cr.)} = 11.$$

Длительность реализации критического пути $\mathbf{R}^{(cr)}(\tau) = \mathbf{R}^{(cr)}(0)$ определяет критическое время $T_\tau^{(e)} = T_0^{(e)} = 15$, которое необходимо для реализации всех работ бизнес-плана и является наименьшим (оптимальным) для бизнес-проекта. Однако задержка выполнения даже одной работы критического пути приведет к увеличению времени выполнения всего проекта.

Затем по процедуре определяется целочисленный массив

$$\mathbf{T}_\tau = \{\tau_k\}_{k \in \{0, \dots, n_\tau^{(cr.)}\}} = \mathbf{T}_0 = \{\tau_k\}_{k \in \{0, \dots, 11\}} = \{0; 3; 4; 6; 7; 8; 9; 11; 12; 13; 14; 15\} = \{\tau_0, \dots, \tau_{11}\},$$

соответствующий событиям $\{1; 2; 3; 8; 10; 18; 19; 22; 24; 25; 26; 27\}$ критического пути

$$\mathbf{R}_\tau^{(cr)} = \{R_1^{(cr)}(0; 3), R_2^{(cr)}(3; 4), R_3^{(cr)}(4; 6), R_4^{(cr)}(6; 7), R_5^{(cr)}(7; 8), R_6^{(cr)}(8; 9), R_7^{(cr)}(9; 11), R_8^{(cr)}(11; 12), R_9^{(cr)}(12; 13), R_{10}^{(cr)}(13; 14), R_{11}^{(cr)}(14; 15)\} = \{R_1(0), R_2(0), R_{11}(0), R_{13}(0), R_{23}(0), R_{27}(0), R_{30}(0), R_{33}(0), R_{35}(0), R_{37}(0), R_{38}(0)\} = \mathbf{R}_0^{(cr)}$$

и содержащий самые ранние сроки начала выполнения работ, выходящих из события, и наиболее поздние сроки завершения работ, входящих в событие критического пути.

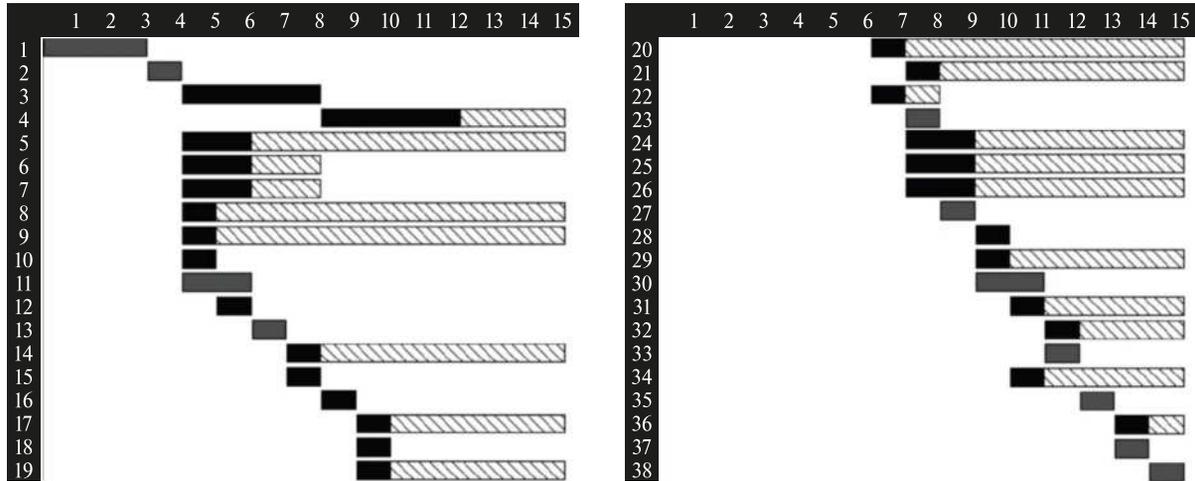


Рис. 6. Календарный график реализации бизнес-планирования, соответствующий периодам $\tau = 0$ и $\tau = 6$

Примечание. Продолжительность выполнения работ проекта в неделях отмечена по оси абсцисс; номер работ — по оси ординат; некритические работы обозначены черными, а критические — серыми прямоугольниками; свободные резервы времени — прямоугольниками со штрихом.

Для сетевой модели $WM_{\tau}^{(e)}(\mathbf{R}(\tau)) = WM_0^{(e)}(\mathbf{R}(0))$ с учетом полученного критического пути $\mathbf{R}_{\tau}^{(cr)} = \{R_1^{(cr)}(0;3), R_2^{(cr)}(3;4), R_3^{(cr)}(4;6), R_4^{(cr)}(6;7), R_5^{(cr)}(7;8), R_6^{(cr)}(8;9), R_7^{(cr)}(9;11), R_8^{(cr)}(11;12), R_9^{(cr)}(12;13), R_{10}^{(cr)}(13;14), R_{11}^{(cr)}(14;15)\} = \mathbf{R}_0^{(cr)}$ и массива длительности исполнения работ $\Delta(\tau) = \{\Delta_1(\tau), \dots, \Delta_{n_{\tau}}(\tau)\} = \{\Delta_1(0), \dots, \Delta_{38}(0)\} = \Delta(0) = \Delta_0$ решается задача построения календарного графика $TG_{\tau}^{(e)}(\mathbf{R}(\tau)) = TG_0^{(e)}(\mathbf{R}(0))$ с указанием возможных сроков проведения всех работ, описываемых набором $\mathbf{R}(\tau) = \{R_1(\tau), \dots, R_{n_{\tau}}(\tau)\} = \mathbf{R}_{\tau} = \{R_1(0), \dots, R_{38}(0)\} = \mathbf{R}(0) = \mathbf{R}_0$.

Календарный график выполнения всех работ бизнес-проекта в формате диаграммы Ганта изображен на рис. 6.

Расчеты показывают, что оптимальное время для завершения данного бизнес-проекта возможно через 15 недель, и такое решение может быть записано в договоре, а его неисполнение повлечет денежный штраф для подрядчика проекта. Принимая это во внимание, подрядчику следует использовать такой способ управления процессом реализации работ проекта, который предусматривает реакцию на все возможные задержки при выполнении соответствующего бизнес-плана, т.е. применяя соответствующую оптимизацию при его осуществлении.

Для сокращения описания процедуры оптимизации адаптивного управления сделано допущение, что в процессе реализации все некритические работы выполняются в наименее ранние сроки, предписанные им текущим календарным графиком.

Учитывая, что в начальный период времени ($\tau = 0$) не происходит задержки выполнения работ, для которых наиболее поздним сроком их исполнения является время $\tau_1 = 3$, в соответствии с методом оптимизации адаптивного управления строится τ_1 -позиция ($\tau_1 = 3$) 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 $\bar{\mathbf{R}}(\tau_1 | \mathbf{R}_0, \mathbf{T}_{\tau}) = \bar{\mathbf{R}}(\tau_1 | \mathbf{R}_0, \mathbf{T}_{\tau}) = \{\bar{R}_1(\tau_1), \dots, \bar{R}_{m_{\tau_1}}(\tau_1)\} = \{\bar{R}_1(\tau_1)\}$ — одноэлементное множество, т.е. $m_{\tau_1} = 1 < n_0 = 38$. При этом $p(\tau_1) = \{\tau_1, \{\bar{R}_1(\tau_1)\}\} = p^{(e)}(\tau_1) = \{\tau_1, \{R_1^{(e)}(\tau_1)\}\} = \{\tau_1, \bar{\mathbf{R}}^{(e)}(\tau_1 | \mathbf{R}_0, \mathbf{T}_{\tau})\} \in \mathbf{P}(\tau_1)$, так как $\bar{R}_1(\tau_1) = R_1(0)$ — это только та работа, которая может и должна быть реализована к периоду времени $\tau_1 = 3$ — в наименее ранний срок, предусмотренный календарным планом.

В соответствии со стратегией $U_a^{(e)} \in U_a$ для реализовавшейся τ_1 -позиции $p^{(e)}(\tau_1) = \{\tau_1, \bar{\mathbf{R}}^{(e)}(\tau_1 | \mathbf{R}_0, \mathbf{T}_{\tau})\} \in \mathbf{P}(\tau_1)$ полагаем:

$$U_a^{(e)}(p^{(e)}(\tau_1)) = \mathbf{R}^{(e)}(\tau_1) = \{\mathbf{R}_0 \setminus \bar{\mathbf{R}}^{(e)}(\tau_1 | \mathbf{R}_0, \mathbf{T}_{\tau})\} = \hat{\mathbf{R}}^{(e)}(\tau_1 | \mathbf{R}_0, \mathbf{T}_{\tau}) = \{R_1(0), \dots, R_{38}(0)\} \setminus \{R_1^{(e)}(\tau_1), \dots, R_{m_{\tau_1}}^{(e)}(\tau_1)\} = \{R_1(\tau_1), \dots, R_{n_{\tau_1}}(\tau_1)\} = \{R_1(\tau_1), \dots, R_{37}(\tau_1)\} = \{R_2(0), \dots, R_{38}(0)\} = \mathbf{R}_{\tau_1}, \quad (1)$$

где $n_{\tau_1} = n_0 - m_{\tau_1} = 38 - 1 = 37$; $\bar{\mathbf{R}}^{(e)}(\tau_1 | \mathbf{R}_0, \mathbf{T}_\tau) = \{R_1^{(e)}(\tau_1)\} = \{\bar{R}_1(\tau_1)\} = \{R_1(0)\}$ — набор работ, соответствующий τ_1 -позиции $p^{(e)}(\tau_1)$ и состоящий из одной работы. С учетом $\mathbf{R}^{(e)}(\tau_1) = \{R_1(\tau_1), \dots, R_{37}(\tau_1)\} = \mathbf{R}_{\tau_1} \neq \emptyset$, определяем $s := s + 1$, $t_s := \tau_1$, $p_a^{(e)}(t_s) := p^{(e)}(\tau_1)$, а с учетом $\Delta(\tau) = \{\Delta_1(\tau), \dots, \Delta_{38}(\tau)\} = \{\Delta_1(0), \dots, \Delta_{38}(0)\} = \Delta_\tau$ определяется массив работ $\mathbf{R}^{(e)}(\tau_1) = \{R_1(\tau_1), \dots, R_{37}(\tau_1)\} = \{R_2(0), \dots, R_{38}(0)\} = \mathbf{R}_{\tau_1}$ и новый массив длительности исполнения работ $\Delta(\tau_1) = \{\Delta_1(\tau_1), \dots, \Delta_{37}(\tau_1)\} = \{\Delta_2(0), \dots, \Delta_{38}(0)\} = \Delta_{\tau_1}$ для нового периода времени $\tau = \tau_1$. Принимаем $\tau := \tau_1 = 3$.

Далее для τ -позиции $p^{(e)}(\tau) = \{\tau, \bar{\mathbf{R}}^{(e)}(\tau | \mathbf{R}_0, \mathbf{T}_\tau)\}$, где $\bar{\mathbf{R}}^{(e)}(\tau | \mathbf{R}_0, \mathbf{T}_\tau) = \{R_1^{(e)}(\tau)\} = \{\bar{R}_1(\tau)\} = \{R_1(0)\}$, и соответствующих ей массивов $\mathbf{R}^{(e)}(\tau) = \{R_1(\tau), \dots, R_{n_\tau}(\tau)\} = \{R_1(\tau), \dots, R_{37}(\tau)\} = \{R_2(0), \dots, R_{38}(0)\} = \mathbf{R}_\tau$ и $\Delta(\tau) = \{\Delta_1(\tau), \dots, \Delta_{n_\tau}(\tau)\} = \{\Delta_1(\tau), \dots, \Delta_{37}(\tau)\} = \{\Delta_2(0), \dots, \Delta_{38}(0)\} = \Delta_\tau$ формируются сетевая модель $\mathbf{WM}_\tau^{(e)}(\mathbf{R}(\tau))$, критический путь

$$\mathbf{R}^{(cr)}(\tau) = \{R_1^{(cr)}(\tau; \tau_1), \dots, R_{n_\tau^{(cr)}}^{(cr)}(\tau; \tau_{n_\tau^{(cr)}-1}; \tau_{n_\tau^{(cr)}})\} = \{R_1^{(cr)}(3;4), R_2^{(cr)}(4;6), R_3^{(cr)}(6;7), R_4^{(cr)}(7;8), R_5^{(cr)}(8;9), R_6^{(cr)}(9;11), R_7^{(cr)}(11;12), R_8^{(cr)}(12;13), R_9^{(cr)}(13;14), R_{10}^{(cr)}(14;15)\} = R_{10}^{(cr)}(14;15) = \mathbf{R}_\tau^{(cr)},$$

критическое время $T_\tau^{(e)} = 15$, массив периодов времени $\mathbf{T}_\tau = \{\tau_k\}_{k \in \{1, \dots, n_\tau^{(sp.)}\}} = \{\tau_k\}_{k \in \{0, \dots, 10\}} = \{3, 4, 6, 7, 8, 9, 11, \dots, 15\} = \{3, 4, 6, 7, 8, 9, 11, \dots, 15\} = \{\tau_0, \dots, \tau_{10}\} (\tau_0 = \tau = 3)$ и календарный график $\mathbf{TG}_\tau^{(e)}(\mathbf{R}(\tau))$.

Учитывая, что в период $\tau_0 = \tau = 3$ не происходит задержки выполнения работ, для которых наиболее поздним сроком их исполнения является время $\tau_1 = 4$, то аналогично описанной выше процедуре для периода $\tau = 0$ реализуется формирование стратегии $U_a^{(e)} \in U_0$ для периода времени $\tau = 3$. А именно на основании имеющихся данных формируется τ_1 -позиция $p(\tau_1) = \{\tau_1, \bar{\mathbf{R}}(\tau_1 | \mathbf{R}_0, \mathbf{T}_\tau)\} \in \mathbf{P}(\tau_1)$, где $\mathbf{P}(\tau_1)$ — множество всех допустимых τ_1 -позиций ($\tau_1 \in \mathbf{T}_\tau$), $\bar{\mathbf{R}}(\tau_1 | \mathbf{R}_0, \mathbf{T}_\tau) = \{\bar{R}_1(\tau_1), \dots, \bar{R}_{m_{\tau_1}}(\tau_1)\} = \{\bar{R}_1(\tau_1), \bar{R}_2(\tau_1)\}$, т.е. $m_{\tau_1} = 2 < n_0 = 38$. При этом

$$p(\tau_1) = \{\tau_1, \{\bar{R}_1(\tau_1), \bar{R}_2(\tau_1)\}\} = p^{(e)}(\tau_1) = \{\tau_1, \{R_1^{(e)}(\tau_1), R_2^{(e)}(\tau_1)\}\} = \{\tau_1, \mathbf{R}^{(e)}(\tau_1 | \mathbf{R}_0, \mathbf{T}_\tau)\} \in \mathbf{P}(\tau_1).$$

Тогда аналогично выполнению соотношений (1) формируется множество

$$U_a^{(e)}(p^{(e)}(\tau_1)) = \mathbf{R}^{(e)}(\tau_1) = \{\mathbf{R}_0 \setminus \bar{\mathbf{R}}^{(e)}(\tau_1 | \mathbf{R}_0, \mathbf{T}_\tau)\} = \hat{\mathbf{R}}^{(e)}(\tau_1 | \mathbf{R}_0, \mathbf{T}_\tau) = \{\hat{R}_1^{(e)}(\tau_1), \dots, \hat{R}_{n_{\tau_1}^{(e)}}^{(e)}(\tau_1)\} = \{R_1(\tau_1), \dots, R_{36}(\tau_1)\} = \{R_3(0), \dots, R_{38}(0)\} = \mathbf{R}_{\tau_1}, n_{\tau_1} = n_0 - m_{\tau_1} = 38 - 2 = 36.$$

Учитывая, что $\mathbf{R}_{\tau_1} \neq \emptyset$, полагаем $s := s + 1$, $t_s := \tau_1$, $p_a^{(e)}(t_s) := p^{(e)}(\tau_1)$. Для массива $\mathbf{R}^{(e)}(\tau_1) = \{R_1(\tau_1), \dots, R_{36}(\tau_1)\} = \{R_3(0), \dots, R_{38}(0)\} = \mathbf{R}_{\tau_1}$ формируем новый массив длительностей исполнения работ $\Delta(\tau_1) = \{\Delta_1(\tau_1), \dots, \Delta_{36}(\tau_1)\} = \{\Delta_3(0), \dots, \Delta_{38}(0)\} = \Delta_{\tau_1}$ для $\tau = \tau_1$. Устанавливаем $\tau := \tau_1 = 4$.

Далее решаем новую задачу календарного планирования для периода $\tau = 4$ и набора работ $\mathbf{R}^{(e)}(\tau_1) = \{R_1(\tau_1), \dots, R_{36}(\tau_1)\} = \{R_3(0), \dots, R_{38}(0)\} = \mathbf{R}_{\tau_1}$, т.е. рассчитываем новый критический путь $\mathbf{R}^{(cr)}(\tau) = \{R_1^{(cr)}(4;6), R_2^{(cr)}(6;7), R_3^{(cr)}(7;8), R_4^{(cr)}(8;9), R_5^{(cr)}(9;11), R_6^{(cr)}(11;12), R_7^{(cr)}(12;13), R_8^{(cr)}(13;14), R_9^{(cr)}(14;15)\} = \mathbf{R}_\tau^{(cr)}$, который служит частью предыдущего критического пути (см. рис. 5) и состоит из работ $\{R_{11}(\tau), R_{13}(\tau), R_{23}(\tau), R_{27}(\tau), R_{30}(\tau), R_{33}(\tau), R_{35}(\tau), R_{37}(\tau), R_{38}(\tau)\} = \{R_{11}(0), R_{13}(0), R_{23}(0), R_{27}(0), R_{30}(0), R_{33}(0), R_{35}(0), R_{37}(0), R_{38}(0)\}$, а также новый календарный график. Этому этапу решения задачи отвечает новый массив периодов $\mathbf{T}_\tau = \{\tau_k\}_{k \in \{1, \dots, n_\tau^{(cr)}\}} = \{\tau_k\}_{k \in \{0, \dots, 9\}} = \{4; 6; 7; 8; 9; 11; 12; 13; 14; 15\} = \{\tau_0, \dots, \tau_9\}$, где $\tau_0 = \tau = 4$.

Учитывая, что в период $\tau = 4$ не происходит задержки выполнения работ, для которых наиболее поздним сроком их исполнения является время $\tau_1 = 6$, определяем τ_1 -позицию 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, $\bar{\mathbf{R}}(\tau_1 | \mathbf{R}_0, \mathbf{T}_\tau) = \{\bar{R}_1(\tau_1), \dots, \bar{R}_{m_{\tau_1}}(\tau_1)\} = \{\bar{R}_1(\tau_1), \dots, \bar{R}_{11}(\tau_1)\}$ — множество, состоящее из 11 элементов ($m_{\tau_1} = 11 < n_0 = 38$).

При этом

$$p(\tau_1) = \{\tau_1, \{\bar{R}_1(\tau_1), \dots, \bar{R}_{11}(\tau_1)\}\} \neq p^{(e)}(\tau_1) = \{\tau_1, \{R_1^{(e)}(\tau_1), \dots, R_{11}^{(e)}(\tau_1)\}\} = \{\tau_1, \bar{\mathbf{R}}^{(e)}(\tau_1 | \mathbf{R}_0, \mathbf{T}_\tau)\} \in \mathbf{P}(\tau_1),$$

так как в наборе работ $\{\bar{R}_1(\tau_1), \dots, \bar{R}_{11}(\tau_1)\} = \{R_1(0), R_2(0), R_3(0), R_5(0), \dots, R_{12}(0)\}$ к началу периода $\tau_1 = 6$ работы $R_3(0)$ и $R_7(0)$ выполнены только частично, а именно выполнены только соответствующие

их части $\tilde{R}_3^{(1)}(0)$ и $\tilde{R}_7^{(1)}(0)$, где $\bar{R}_3(\tau_1) = \tilde{R}_3^{(1)}(0) \cup \tilde{R}_3^{(1)}(0) = R_3(0)$; $\bar{R}_6(\tau_1) = \tilde{R}_7^{(1)}(0) \cup \tilde{R}_7^{(1)}(0) = R_7(0)$; $\tilde{R}_3^{(1)}(0)$ и $\tilde{R}_7^{(1)}(0)$ — оставшиеся для выполнения части этих работ. Пусть

$$\begin{aligned} \tilde{R}(\tau_1) = \{\tilde{R}_1(\tau_1), \dots, \tilde{R}_{l_{\tau_1}}(\tau_1)\} &= \{\tilde{R}_1(\tau_1), \tilde{R}_2(\tau_1)\} = \{\tilde{R}_3^{(1)}(0), \tilde{R}_7^{(1)}(0)\} = \tilde{R}_{\tau_1} \dots, \tilde{R}_{l_{\tau_1}}(\tau_1) = \\ &= \{\tilde{R}_1(\tau_1), \tilde{R}_2(\tau_1)\} = \{\tilde{R}_3^{(1)}(0), \tilde{R}_7^{(1)}(0)\} = R_{\tau_1}, \end{aligned}$$

где $l_{\tau_1} = 2$. Обозначим $\tilde{\Delta}_3^{(1)}(\tau_1) = \tilde{\Delta}_3^{(1)}(0) = 2$ и $\tilde{\Delta}_7^{(1)}(\tau_1) = \tilde{\Delta}_7^{(1)}(0) = 2$ — время в неделях, затраченное на выполнение работ $\tilde{R}_3^{(1)}(0)$ и $\tilde{R}_7^{(1)}(0)$; $\tilde{\Delta}_3^{(1)}(\tau_1) = \tilde{\Delta}_3^{(1)}(0) = 2$ и $\tilde{\Delta}_7^{(1)}(\tau_1) = \tilde{\Delta}_7^{(1)}(0) = 2$ — время в неделях, необходимое для выполнения работ $\tilde{R}_3^{(1)}(0)$ и $\tilde{R}_7^{(1)}(0)$.

В соответствии со стратегией $U_a^{(e)} \in U_a$ для реализовавшейся τ_1 -позиции полагаем

$$\begin{aligned} U_a^{(e)}(p(\tau_1)) = \mathbf{R}(\tau_1) = \tilde{\mathbf{R}}(\tau_1) \cup \{\mathbf{R}_0 \setminus \tilde{\mathbf{R}}(\tau_1 | \mathbf{R}_0, \mathbf{T}_\tau)\} &= \hat{\mathbf{R}}(\tau_1 | \mathbf{R}_0, \mathbf{T}_\tau) = \{\tilde{R}_3^{(1)}(0), \tilde{R}_7^{(1)}(0)\} \cup \\ \cup \{R_1(0), \dots, R_{38}(0)\} \setminus \{\tilde{R}_1(\tau_1), \dots, \tilde{R}_{m_{\tau_1}}(\tau_1)\} &= \{\hat{R}_1(\tau_1), \dots, \hat{R}_{n_{\tau_1}}(\tau_1)\} = \{R_1(\tau_1), \dots, R_{29}(\tau_1)\} = \\ = \{\tilde{R}_3^{(1)}(0), R_4(0), \tilde{R}_7^{(1)}(0), R_{13}(0), R_{14}(0), \dots, R_{38}(0)\} &= \mathbf{R}_{\tau_1} \end{aligned} \quad (2)$$

где

$$l_{\tau_1} = 2; n_{\tau_1} = n_0 - m_{\tau_1} + l_{\tau_1} = 38 - 11 + 2 = 29;$$

$$\tilde{\mathbf{R}}(\tau_1 | \mathbf{R}_0, \mathbf{T}_\tau) = \{\tilde{R}_1(\tau_1), \tilde{R}_2(\tau_1), \dots, \tilde{R}_{11}(\tau_1)\} = \{R_1(0), R_2(0), R_3(0), R_5(0), R_6(0), \dots, R_{12}(0)\} —$$

набор работ, отвечающий τ_1 -позиции $p(\tau_1)$ и содержащий 11 работ. Учитывая, что $\mathbf{R}(\tau_1) = \{R_1(\tau_1), \dots, R_{29}(\tau_1)\} \neq \emptyset$, устанавливаем: $s := s + 1$; $t_s := \tau_1$; $p_a^{(e)}(t_s) := p(\tau_1)$. По массиву $\Delta(\tau) = \{\Delta_1(\tau), \dots, \Delta_{36}(\tau)\} = \{\Delta_3(0), \dots, \Delta_{38}(0)\} = \Delta_\tau$ определяем новые массивы

$$\mathbf{R}(\tau_1) = \{R_1(\tau_1), \dots, R_{29}(\tau_1)\} = \{\tilde{R}_3^{(1)}(0), R_4(0), \tilde{R}_7^{(1)}(0), R_{13}(0), \dots, R_{38}(0)\} = \mathbf{R}_{\tau_1}$$

и

$$\Delta(\tau_1) = \{\Delta_1(\tau_1), \dots, \Delta_{29}(\tau_1)\} = \{\tilde{\Delta}_3^{(1)}(0), \Delta_4(0), \tilde{\Delta}_7^{(1)}(0), \Delta_{13}(0), \dots, \Delta_{38}(0)\} = \Delta_{\tau_1}$$

для периода $\tau = \tau_1$. Устанавливаем $\tau := \tau_1 = 6$.

Учитывая, что в период $\tau = 6$ не происходит задержки выполнения работ, для которых наиболее поздним сроком исполнения является время $\tau_1 = 7$, аналогично процедуре, выполненной для периода $\tau = 4$, и на основании соотношений (2) конструируются следующие элементы:

1) τ_1 -позиция ($\tau_1 = 7$) проекта $p(\tau_1) = \{\tau_1, \mathbf{R}(\tau_1 | \mathbf{R}_0, \mathbf{T}_\tau)\} \in \mathbf{P}(\tau_1)$, где множество работ

$$\begin{aligned} \mathbf{R}(\tau_1 | \mathbf{R}_0, \mathbf{T}_\tau) = \{\tilde{R}_1(\tau_1), \dots, \tilde{R}_{m_{\tau_1}}(\tau_1)\} &= \{\tilde{R}_1(\tau_1), \dots, \tilde{R}_{14}(\tau_1)\} = \{R_1(0), R_2(0), R_3(0), R_5(0), \dots, \\ &R_{13}(0), R_{20}(0), R_{22}(0)\} \end{aligned}$$

есть множество, состоящее из 14 элементов, т.е. $m_{\tau_1} = 14 < n_0 = 38$. При этом $p(\tau_1) = \{\tau_1, \{\tilde{R}_1(\tau_1), \dots, \tilde{R}_{14}(\tau_1)\}\} \neq p^{(e)}(\tau_1) = \{\tau_1, \{R_1^{(e)}(\tau_1), \dots, R_{14}^{(e)}(\tau_1)\}\} = \{\tau_1, \mathbf{R}^{(e)}(\tau_1 | \mathbf{R}_0, \mathbf{T}_\tau)\} \in \mathbf{P}(\tau_1)$;

2) представление частично выполненных работ

$$\bar{R}_3(\tau_1) = \tilde{R}_3^{(1)}(0) \cup \tilde{R}_3^{(2)}(0) \cup \tilde{R}_3^{(2)}(0) = R_3(0); \bar{R}_6(\tau_1) = \tilde{R}_7^{(1)}(0) \cup \tilde{R}_7^{(2)}(0) \cup \tilde{R}_7^{(2)}(0) = R_7(0);$$

3) массив невыполненных частей работ

$$\mathbf{R}(\tau_1) = \{\tilde{R}_1(\tau_1), \dots, \tilde{R}_{l_{\tau_1}}(\tau_1)\} = \{\tilde{R}_1(\tau_1), \tilde{R}_2(\tau_1)\} = \{\tilde{R}_3^{(2)}(0), \tilde{R}_7^{(2)}(0)\} = \mathbf{R}_{\tau_1},$$

где $l_{\tau_1} = 2$; $\tilde{\Delta}_3^{(2)}(\tau_1) = \tilde{\Delta}_3^{(2)}(0) = 1$ и $\tilde{\Delta}_7^{(2)}(\tau_1) = \tilde{\Delta}_7^{(2)}(0) = 1$ — время, затраченное на выполнение работ $\tilde{R}_3^{(2)}(0)$ и $\tilde{R}_7^{(2)}(0)$; $\tilde{\Delta}_3^{(2)}(\tau_1) = \tilde{\Delta}_3^{(2)}(0) = 1$ и $\tilde{\Delta}_7^{(2)}(\tau_1) = \tilde{\Delta}_7^{(2)}(0) = 1$ — время, необходимое для выполнения работ $\tilde{R}_3^{(2)}(0)$ и $\tilde{R}_7^{(2)}(0)$;

4) выходной массив исполнения стратегии оптимального адаптивного управления

$$\begin{aligned} U_a^{(e)}(p(\tau_1)) = \mathbf{R}(\tau_1) = \tilde{\mathbf{R}}(\tau_1) \cup \{\mathbf{R}_0 \setminus \tilde{\mathbf{R}}(\tau_1 | \mathbf{R}_0, \mathbf{T}_\tau)\} &= \{\hat{R}_1(\tau_1), \dots, \hat{R}_{n_{\tau_1}}(\tau_1)\} = \{R_1(\tau_1), \dots, R_{26}(\tau_1)\} = \\ = \{\tilde{R}_3^{(2)}(0), R_4(0), \tilde{R}_7^{(2)}(0), R_{14}(0), \dots, R_{19}(0), R_{21}(0), R_{23}(0), \dots, R_{38}(0)\} &= \mathbf{R}_{\tau_1}, \end{aligned}$$

где $l_{\tau_1} = 2$; $n_{\tau_1} = n_0 - m_{\tau_1} + l_{\tau_1} = 38 - 14 + 2 = 26$; учитывая, что $\mathbf{R}_{\tau_1} \neq \emptyset$, то полагается: $s := s + 1$; $t_s := \tau_1$; $p_a^{(e)}(t_s) := p(\tau_1)$;

5) для массива

$$R(\tau_1) = \{R_1(\tau_1), \dots, R_{26}(\tau_1)\} = \{\tilde{R}_3^{(2)}(0), R_4(0), \tilde{R}_7^{(2)}(0), R_{14}(0), \dots, R_{19}(0), R_{21}(0), R_{23}(0), \dots, R_{38}(0)\} = \mathbf{R}_{\tau_1}$$

получаем новый массив

$$\Delta(\tau_1) = \{\Delta_1(\tau_1), \dots, \Delta_{26}(\tau_1)\} = \{\tilde{\Delta}_3^{(2)}(0), \Delta_4(0), \tilde{\Delta}_7^{(2)}(0), \Delta_{14}(0), \dots, \Delta_{19}(0), \Delta_{21}(0), \Delta_{23}(0), \dots, \Delta_{38}(0)\} = \Delta_{\tau_1},$$

соответствующий периоду $\tau = \tau_1$. Устанавливаем $\tau = \tau_1 = 7$.

Решаем новую задачу календарного планирования для периода $\tau = 7$ и набора работ $\mathbf{R}(\tau) = \{R_1(\tau), \dots, R_{26}(\tau)\} = \mathbf{R}_{\tau}$. Создаем новый критический путь бизнес-плана $\mathbf{R}^{(cr)}(\tau) = \{R_1^{(cr)}(7;8), R_2^{(cr)}(8;9), R_3^{(cr)}(9;11), R_4^{(cr)}(11;12), R_5^{(cr)}(12;13), R_4^{(cr)}(11;12), R_5^{(cr)}(12;13), R_6^{(cr)}(13;14), R_7^{(cr)}(14;15)\} = \mathbf{R}_{\tau}^{(cr)}$, который состоит из набора работ

$$\{R_{23}(\tau), R_{27}(\tau), R_{30}(\tau), R_{33}(\tau), R_{35}(\tau), R_{37}(\tau), R_{38}(\tau)\} = \{R_{23}(0), R_{27}(0), R_{30}(0), R_{33}(0), R_{35}(0), R_{37}(0), R_{38}(0)\},$$

и определяем новый календарный план-график. Также формируем новый массив периодов времени $\mathbf{T}_{\tau} = \{\tau_k\}_{k \in \{1, \dots, n^{(cr)}\}} = \{\tau_k\}_{k \in \{0, \dots, 7\}} = \{7; 8; 9; 11; 12; 13; 14; 15\} = \{\tau_0, \dots, \tau_7\}$, где $\tau_0 = \tau = 7$.

Рассмотрим подробнее работу $R_7(\tau) = R_7(0)$ («Регистрация ККМ»¹) и на ее примере продемонстрируем выполнение оптимизации управления с обратной связью, т.е. используя адаптивное управление бизнес-проектом. Исполнение работы $R_7(\tau) = R_7(0)$ по подключению онлайн-кассы предполагает осуществление 8 этапов: 1) подключение Интернета; 2) получение электронной цифровой подписи (ЭЦП) в удостоверяющем центре; 3) заключение договора с оператором фискальных данных (ОФД); 4) решение о модернизации кассы; 5) покупка фискального накопителя (ФН); 6) покупка комплекта для модернизации кассы — вызов сотрудников центра технического обслуживания (ЦТО), обновление кассы; 7) постановка кассы на учет и ее настройка; 8) проверка и отладка работоспособности кассы. Отметим, что для простоты рассматриваем случай только одной кассы.

На выполнение перечисленных этапов было запланировано 4 недели (см. таблицу). На этапе 6 произошла ошибка — организаторы проекта много времени уделяли этапу 5 по получению ФН и забыли, что необходимо еще купить комплект модернизации. Оказалось, что у ЦТО возникли перебои с поставкой комплектов модернизации и их нужно было заказывать заранее. В итоге, когда ФН был получен, для модернизации кассы отсутствовали необходимые комплектующие и ЦТО попросил подождать. Для того чтобы получить и установить комплект модернизации, потребовалась еще 1 неделя.

Между событиями 5 и 18 введем событие с номером А5, соответствующее времени начала задержки работы $R_7(\tau) = R_7(0)$ (рис. 7). Завершение текущего периода $\tau = 7$, соответствующего реализации 8 недели бизнес-плана и завершению задержки (т.е. $\tau_1 = 8$), обозначим А18.

Переменная $Z(\tau)$ и двойной направленный отрезок, выходящий из события А5 и входящий в событие А18 (рис. 7), указывают на задержку исполнения работы $R_7(\tau) = R_7(0)$ с длительностью

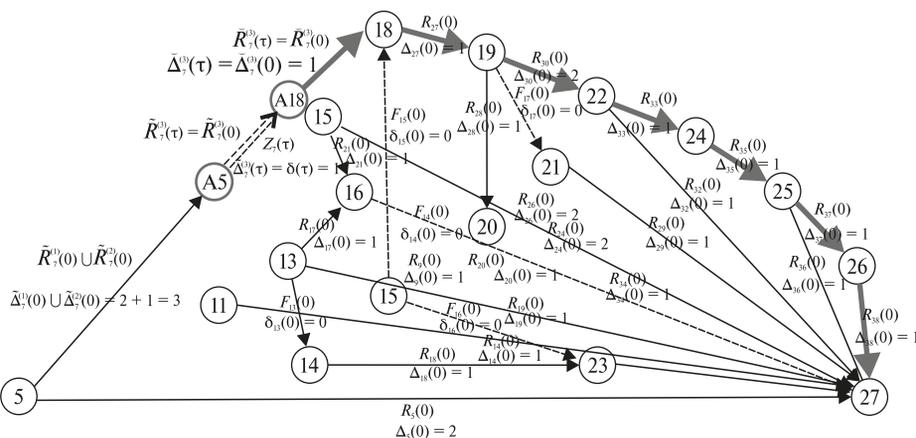


Рис. 7. Критический путь в сетевой модели бизнес-планирования, соответствующий периоду времени $\tau = 8$

¹ ККМ — контрольно-кассовые машины, с 2016 г. онлайн-касса.

$\delta_7(\tau)=1$ (неделя). Тогда, учитывая, что работа $R_7(\tau)$ к завершению периода $\tau=7$ и к началу $\tau_1=8$ выполнена только частично, т.е. выполнена часть $\{\tilde{R}_7^{(1)}(0)\cup\tilde{R}_7^{(2)}(0)\cup\tilde{R}_7^{(3)}(0)\}\subset R_7(0)$, где $\tilde{R}_7^{(3)}(0)$ — часть $R_7(0)$, выполненная в период задержки, на которую затрачено $\tilde{\Delta}_7^{(1)}(0)\cup\tilde{\Delta}_7^{(2)}(0)\cup\tilde{\Delta}_7^{(3)}(0)=2+1+1=4$ недели, для реализации оставшейся части $\tilde{R}_7^{(3)}(\tau)=\tilde{R}_7^{(3)}(0)$ с учетом задержки в 1 неделю необходим период $\tilde{\Delta}_7^{(3)}(\tau)=\tilde{\Delta}_7^{(3)}(0)=\Delta_7(0)+1-4=4+1-4=1$. На рис. 7 выполненная к началу времени $\tau=7$ часть работы $R_7(\tau)=R_7(0)$, т.е. работа $\tilde{R}_7^{(1)}(0)\cup\tilde{R}_7^{(2)}(0)$, обозначена ребром, выходящим из события под номером 5 и входящим в событие под номером А5. Работа $\tilde{R}_7^{(3)}(\tau)=\tilde{R}_7^{(3)}(0)$ выходит из А5 и входит в А18, т.е. выполняется в период задержки, а работа $\tilde{R}_7^{(3)}(\tau)=\tilde{R}_7^{(3)}(0)$, которая является оставшейся частью работы $R_7(\tau)=R_7(0)$, обозначена ребром, выходящим из А18 и входящим в событие 18.

Отметим, что, изменяя аналогичным образом все работы бизнес-плана, можно корректировать их реализацию и принимать необходимые решения, например предусмотреть дополнительное соглашение к договору с кредиторами и устранить, таким образом, возможные для хозяйствующего субъекта негативные последствия.

Учитывая возникшую задержку при выполнении работы $R_7(\tau)=R_7(0)$, на основе предлагаемого метода, процедуре, описанной для периода $\tau=4$, и соотношений (2) конструируются следующие элементы решения:

1) τ_1 -позиция ($\tau_1=8$) проекта $p(\tau_1)=\{\tau_1, \mathbf{R}(\tau_1|\mathbf{R}_0, \mathbf{T}_\tau)\}\in\mathbf{P}(\tau_1)$, где

$$\mathbf{R}(\tau_1|\mathbf{R}_0, \mathbf{T}_\tau)=\{\bar{R}_1(\tau_1), \dots, \bar{R}_{m_{\tau_1}}(\tau_1)\}=\{\bar{R}_1(\tau_1), \dots, \bar{R}_{21}(\tau_1)\} —$$

множество из 21 элемента ($m_{\tau_1}=21 < n_0=38$). При этом

$$p(\tau_1)=\{\tau_1, \{\bar{R}_1(\tau_1), \dots, \bar{R}_{21}(\tau_1)\}\} \neq p^{(e)}(\tau_1)=\{\tau_1, \{R_1^{(e)}(\tau_1), \dots, R_{21}^{(e)}(\tau_1)\}\}=\{\tau_1, \bar{\mathbf{R}}^{(e)}(\tau_1|\mathbf{R}_0, \mathbf{T}_\tau)\}\in\mathbf{P}(\tau_1);$$

2) частично выполненные работы

$$\begin{aligned} \bar{R}_6(\tau_1) &= \tilde{R}_7^{(1)}(0)\cup\tilde{R}_7^{(2)}(0)\cup\tilde{R}_7^{(3)}(0)\cup R_7(0); \bar{R}_{19}(\tau_1) = \tilde{R}_{24}^{(1)}(0)\cup\tilde{R}_{24}^{(1)}(0) = R_{24}(0); \\ \bar{R}_{20}(\tau_1) &= \tilde{R}_{25}^{(1)}(0)\cup\tilde{R}_{25}^{(1)}(0) = R_{25}(0); \bar{R}_{21}(\tau_1) = \tilde{R}_{26}^{(1)}(0)\cup\tilde{R}_{26}^{(1)}(0) = R_{26}(0); \end{aligned}$$

3) невыполненные части работ

$$\bar{\mathbf{R}}(\tau_1)=\{\bar{R}_1(\tau_1), \dots, \bar{R}_{\tau_1}^{(1)}(\tau_1)\}=\{\bar{R}_1(\tau_1), \bar{R}_2(\tau_1), \bar{R}_3(\tau_1), \bar{R}_4(\tau_1)\}=\{\bar{R}_7^{(3)}(0), \bar{R}_{24}^{(1)}(0), \bar{R}_{25}^{(1)}(0), \bar{R}_{26}^{(1)}(0)\}=\mathbf{R}_{\tau_1},$$

где $l_{\tau_1}=4$; $\tilde{\Delta}_7^{(3)}(\tau_1)=\tilde{\Delta}_7^{(3)}(0)=1$; $\tilde{\Delta}_{24}^{(1)}(\tau_1)=\tilde{\Delta}_{24}^{(1)}(0)=1$, $\tilde{\Delta}_{25}^{(1)}(\tau_1)=\tilde{\Delta}_{25}^{(1)}(0)=1$ и $\tilde{\Delta}_{26}^{(1)}(\tau_1)=\tilde{\Delta}_{26}^{(1)}(0)=1$ — время, затраченное на выполнение работ

$$\tilde{R}_7^{(3)}(0), \tilde{R}_{24}^{(1)}(0), \tilde{R}_{25}^{(1)}(0) \text{ и } \tilde{R}_{26}^{(1)}(0);$$

$$\tilde{\Delta}_7^{(3)}(\tau_1)=\tilde{\Delta}_7^{(3)}(0)=1, \tilde{\Delta}_{24}^{(1)}(\tau_1)=\tilde{\Delta}_{24}^{(1)}(0)=1, \tilde{\Delta}_{25}^{(1)}(\tau_1)=\tilde{\Delta}_{25}^{(1)}(0)=1 \text{ и } \tilde{\Delta}_{26}^{(1)}(\tau_1)=\tilde{\Delta}_{26}^{(1)}(0)=1 —$$

время, необходимое для выполнения работ $\tilde{R}_7^{(3)}(0), \tilde{R}_{24}^{(1)}(0), \tilde{R}_{25}^{(1)}(0), \tilde{R}_{26}^{(1)}(0)$;

4) выходной массив стратегии оптимального адаптивного управления

$$\begin{aligned} U_a^{(e)}(p(\tau_1)) &= \mathbf{R}(\tau_1) = \mathbf{R}(\tau_1)\cup\{\mathbf{R}_0 \setminus \mathbf{R}(\tau_1|\mathbf{R}_0, \mathbf{T}_\tau)\} = \hat{\mathbf{R}}(\tau_1|\mathbf{R}_0, \mathbf{T}_\tau) = \{\hat{R}_1(\tau_1), \dots, \hat{R}_{n_{\tau_1}}(\tau_1)\} = \{R_1(\tau_1), \dots, R_{21}(\tau_1)\} = \\ &= \{R_4(0), \tilde{R}_7^{(3)}(0), R_{16}(0), R_{17}(0), R_{18}(0), R_{19}(0), \tilde{R}_{24}^{(1)}(0), \tilde{R}_{25}^{(1)}(0), \tilde{R}_{26}^{(1)}(0), R_{27}(0), \dots, R_{38}(0)\} = \mathbf{R}_{\tau_1}, \end{aligned}$$

где $l_{\tau_1}=4$, $n_{\tau_1}=n_0-m_{\tau_1}+l_{\tau_1}=38-21+4=21$. Учитывая, что $\mathbf{R}_{\tau_1}\neq\emptyset$, полагаем $s:=s+1$; $t_s:=\tau_1$; $p_a^{(e)}(t_s):=p(\tau_1)$;

5) для массива работ

$$\begin{aligned} \mathbf{R}(\tau_1) &= \{R_1(\tau_1), \dots, R_{21}(\tau_1)\} = \{R_4(0), \tilde{R}_7^{(3)}(0), R_{16}(0), \dots, R_{19}(0), \\ &\tilde{R}_{24}^{(1)}(0), \tilde{R}_{25}^{(1)}(0), \tilde{R}_{26}^{(1)}(0), R_{27}(0), \dots, R_{38}(0)\} = \mathbf{R}_{\tau_1} \end{aligned}$$

имеем новый массив длительности исполнения работ

$$\begin{aligned} \Delta(\tau_1) &= \{\Delta_1(\tau_1), \dots, \Delta_{21}(\tau_1)\} = \{\Delta_4(0), \tilde{\Delta}_7^{(3)}(0), \Delta_{16}(0), \dots, \Delta_{19}(0), \\ &\tilde{\Delta}_{24}^{(1)}(0), \tilde{\Delta}_{25}^{(1)}(0), \tilde{\Delta}_{26}^{(1)}(0), \Delta_{27}(0), \dots, \Delta_{38}(0)\} = \Delta_{\tau_1} \end{aligned}$$

для периода $\tau=\tau_1$. Устанавливаем $\tau:=\tau_1=8$.

Затем в результате решения новой задачи календарного планирования для $\tau=8$ и набора работ

$$\mathbf{R}(\tau)=\{R_1(\tau), \dots, R_{21}(\tau)\} = \{R_4(0), \tilde{R}_7^{(3)}(0), R_{16}(0), \dots, R_{19}(0), \tilde{R}_{24}^{(1)}(0), \tilde{R}_{25}^{(1)}(0), \tilde{R}_{26}^{(1)}(0), R_{27}(0), \dots, R_{38}(0)\} = \mathbf{R}_\tau$$

определяется новый критический путь

$$\mathbf{R}^{(cr)}(\tau) = \{R_1^{(cr)}(8;9), R_2^{(cr)}(9;10), R_3^{(cr)}(10;12), R_4^{(cr)}(12;13), R_5^{(cr)}(13;14), R_6^{(cr)}(14;15), R_7^{(cr)}(15;16)\} = \mathbf{R}_\tau^{(cr)},$$

где $n_\tau^{(cr)} = 7$, который состоит из набора работ

$$\begin{aligned} & \{\bar{R}_7^{(3)}(\tau), R_{27}(\tau), R_{30}(\tau), R_{33}(\tau), R_{35}(\tau), R_{37}(\tau), R_{38}(\tau)\} = \\ & = \{\bar{R}_7(0), R_{27}(0), R_{30}(0), R_{33}(0), R_{35}(0), R_{37}(0), R_{38}(0)\} \text{ (см. рис. 7)}. \end{aligned}$$

При этом работа $\bar{R}_7^{(3)}(\tau) = \bar{R}_7^{(3)}(0) \neq R_7(0)$, где $\bar{R}_7^{(3)}(\tau)$ (нереализованная часть работы $R_7(0)$) — критическая. Сформированному новому критическому пути $\mathbf{R}^{(cr)}$ отвечает новый массив периодов времени $\mathbf{T}_\tau = \{\tau_k\}_{k \in \{1, \dots, n_\tau^{(cr)}\}} = \{\tau_k\}_{k \in \{0, \dots, 7\}} = \{8;9;10;12;13;14;15;16\} = \{\tau_0, \dots, \tau_7\}$, где $\tau_0 = \tau = 8$, и он соответствует событиям $\{A_{18};18;19;22;24;25;26;27\}$ сетевой модели. Новые данные вместе с критическим временем $T_\tau^{(e)} = 16$ запоминаются.

С учетом нового критического пути $\mathbf{R}_\tau^{(cr)}$ происходит определение нового календарного плана-графика исполнения всех нерезализованных работ бизнес-плана, соответствующих набору работ

$$\begin{aligned} \mathbf{R}(\tau) = \{R_1(\tau), \dots, R_{21}(\tau)\} &= \{R_4(0), \bar{R}_7^{(3)}(0), R_{16}(0), \dots, R_{19}(0), \\ & \bar{R}_{24}^{(1)}(0), \bar{R}_{25}^{(1)}(0), \bar{R}_{26}^{(1)}(0), R_{27}(0), \dots, R_{38}(0)\} = \mathbf{R}_{\tau_1}, \end{aligned}$$

содержащему возможные для их выполнения сроки и учитывающему произошедшую задержку работы $R_7(\tau)$ (рис. 8).

К началу периода времени $\tau_1 = 9$ работы

$$R_7(\tau) = \bar{R}_7^{(1)}(\tau) \cup \bar{R}_7^{(2)}(\tau) \cup \bar{R}_7^{(3)}(\tau) \cup \bar{R}_7^{(3)}(\tau) = \bar{R}_7^{(1)}(0) \cup \bar{R}_7^{(2)}(0) \cup \bar{R}_7^{(3)}(0) \cup \bar{R}_7^{(3)}(0) = R_7(0)$$

выполнены в полном объеме, а также полностью или частично выполнены работы, для которых наименее ранним сроком исполнения является время $\tau_1 = 9$.

То есть для 9 недели, аналогично процедуре, описанной для периода времени $\tau = 4$ и согласно (2), конструируются следующие элементы решения:

1) $\tau_1 = 9, p(\tau_1) = \{\tau_1, \mathbf{R}(\tau_1 | \mathbf{R}_0, \mathbf{T}_\tau)\} \in \mathbf{P}(\tau_1), \mathbf{R}(\tau_1 | \mathbf{R}_0, \mathbf{T}_\tau) = \{\bar{R}_1(\tau_1), \dots, \bar{R}_{m_{\tau_1}}(\tau_1)\} = \{\bar{R}_1(\tau_1), \dots, \bar{R}_{23}(\tau_1)\} = \{R_1(0), \dots, R_{16}(0), R_{20}(0), \dots, R_{26}(0)\}$ есть множество, состоящее из 23 элементов, т.е. $m_{\tau_1} = 23 < n_0 = 38$.

При этом $p(\tau_1) = \{\tau_1, \{\bar{R}_1(\tau_1), \dots, \bar{R}_{23}(\tau_1)\}\} \neq p^{(e)}(\tau_1) = \{\tau_1, \{R_1^{(e)}(\tau_1), \dots, R_{23}^{(e)}(\tau_1)\}\} = \{\tau_1, \mathbf{R}^{(e)}(\tau_1 | \mathbf{R}_0, \mathbf{T}_\tau)\} \in \mathbf{P}(\tau_1);$

2) представление частично выполненной работы $\bar{R}_4(\tau_1) = \bar{R}_4^{(1)}(0) \cup \bar{R}_4^{(1)}(0) = R_4(0);$

3) массив невыполненных частей работ $\mathbf{R}(\tau_1) = \{\bar{R}_1(\tau_1), \dots, \bar{R}_{l_{\tau_1}}(\tau_1)\} = \{\bar{R}_1(\tau_1)\} = \{\bar{R}_4^{(1)}(0)\} = \mathbf{R}_{\tau_1}$, где $l_{\tau_1} = 1; \bar{\Delta}_4^{(1)}(\tau_1) = \bar{\Delta}_4^{(1)}(0) = 1$ — время, затраченное на выполнение работы $\bar{R}_4^{(1)}(0); \bar{\Delta}_4^{(1)}(\tau_1) = \bar{\Delta}_4^{(1)}(0) = 3$ — время, необходимое для выполнения работы $\bar{R}_4^{(1)}(0);$



Рис. 8. Календарный график бизнес-планирования, соответствующий периоду времени $\tau = 8$

4) выходной массив исполнения стратегии оптимального адаптивного управления

$$U_a^{(e)}(p(\tau_1)) = \mathbf{R}(\tau_1) = \mathbf{R}(\tau_1) \cup \{\mathbf{R}_0 \setminus \mathbf{R}(\tau_1 | \mathbf{R}_0, \mathbf{T}_\tau)\} = \mathbf{R}(\tau_1 | \mathbf{R}_0, \mathbf{T}_\tau) = \{\hat{R}_1(\tau_1), \dots, \hat{R}_{n_{\tau_1}}(\tau_1)\} = \\ = \{R_1(\tau_1), \dots, R_{16}(\tau_1)\} = \{\bar{R}_4^{(1)}(0), R_{17}(0), R_{18}(0), R_{19}(0), R_{27}(0), \dots, R_{38}(0)\} = \mathbf{R}_{\tau_1},$$

где $l_{\tau_1} = 2$; $n_{\tau_1} = n_0 - m_{\tau_1} + l_{\tau_1} = 38 - 23 + 1 = 16$. Учитывая, что $\mathbf{R}_{\tau_1} \neq \emptyset$, полагаем $s := s + 1$; $t_s := \tau_1$; $p_a^{(e)}(t_s) := p(\tau_1)$;

5) для массива работ

$$\mathbf{R}(\tau_1) = \{R_1(\tau_1), \dots, R_{16}(\tau_1)\} = \{\bar{R}_4^{(1)}(0), R_{17}(0), R_{18}(0), R_{19}(0), R_{27}(0), \dots, R_{38}(0)\} = \mathbf{R}_{\tau_1}$$

формируем новый массив длительности исполнения работ $\Delta(\tau_1) = \{\Delta_1(\tau_1), \Delta_2(\tau_1), \dots, \Delta_{16}(\tau_1)\} = \{\bar{\Delta}_4^{(1)}(0), \Delta_{17}(0), \Delta_{18}(0), \Delta_{19}(0), \{\bar{\Delta}_4^{(1)}(0), \Delta_{17}(0), \Delta_{18}(0), \Delta_{19}(0), \Delta_{27}(0), \Delta_{28}(0), \dots, \Delta_{38}(0)\} = \Delta_{\tau_1}$ для $\tau = \tau_1$. Устанавливаем $\tau := \tau_1 = 9$.

Для $\tau = 9$ реализация стратегии $U_a^{(e)} \in \mathbf{U}_0$ проводится аналогично процедуре для $\tau = 4$. А именно $p(\tau) = \{\tau, \mathbf{R}(\tau | \mathbf{R}_0, \mathbf{T}_\tau)\} \in \mathbf{P}(\tau)$, множество работ $\mathbf{R}(\tau | \mathbf{R}_0, \mathbf{T}_\tau) = \{\bar{R}_1(\tau), \dots, \bar{R}_{m_\tau}(\tau)\}$, массив работ $\mathbf{R}(\tau) = \bar{\mathbf{R}}(\tau) \cup \{\mathbf{R}_0 \setminus \bar{\mathbf{R}}(\tau | \mathbf{R}_0, \mathbf{T}_\tau)\} = \hat{\mathbf{R}}(\tau | \mathbf{R}_0, \mathbf{T}_\tau) = \{\hat{R}_1(\tau), \dots, \hat{R}_{n_\tau}(\tau)\}$, $\bar{\mathbf{R}}(\tau) = \{\bar{R}_1(\tau), \dots, \bar{R}_{m_\tau}(\tau)\}$; $n_\tau = n_0 - m_\tau + l_\tau$, массив длительности исполнения работ $\Delta(\tau) = \{\Delta_1(\tau), \dots, \Delta_{n_\tau}(\tau)\}$. По этим данным формируются сетевая модель $\mathbf{WM}_\tau^{(e)}(\mathbf{R}(\tau))$, критический путь $\mathbf{R}^{(cr)}(\tau) = \{R_1^{(cr)}(\tau; \tau_1), R_2^{(cr)}(\tau; \tau_2), \dots, R_{n_\tau^{(cr)}}^{(cr)}(\tau_{n_\tau^{(cr)}-1}; \tau_{n_\tau^{(cr)}})\}$, критическое время $T_\tau^{(e)} = 16$, массив периодов времени $\mathbf{T}_\tau = \{\tau_k\}_{k \in \{1, \dots, n_\tau^{(cr)}\}} (\tau_0 = \tau)$ и календарный график $\mathbf{TG}_\tau^{(e)}(\mathbf{R}(\tau))$.

Учитывая, что в период $\tau_0 = \tau = 9$ не происходит задержки исполнения работ, для которых наиболее поздним сроком их исполнения является время $\tau_1 = 10$, реализуется формирование стратегии $U_a^{(e)} \in \mathbf{U}_0$ для периода времени $\tau_1 = 10$. А именно на основании имеющихся данных формируется τ_1 -позиция $p(\tau_1) = \{\tau_1, \mathbf{R}(\tau_1 | \mathbf{R}_0, \mathbf{T}_\tau)\} \in \mathbf{P}(\tau_1)$, где $\mathbf{P}(\tau_1)$ — множество всех допустимых τ_1 -позиций ($\tau_1 \in \mathbf{T}_\tau$), множество работ $\mathbf{R}(\tau_1 | \mathbf{R}_0, \mathbf{T}_\tau) = \{\bar{R}_1(\tau_1), \dots, \bar{R}_{m_{\tau_1}}(\tau_1)\}$, $m_{\tau_1} < n_0 = 38$. При этом имеем $p(\tau_1) \neq p^{(e)}(\tau_1) = \{\tau_1, \bar{\mathbf{R}}^{(e)}(\tau_1 | \mathbf{R}_0, \mathbf{T}_\tau)\} \in \mathbf{P}(\tau_1)$. Тогда аналогично выполнению соотношений (2) формируется соответствующее $\tau_1 = 10$ множество $U_a^{(e)}(p^{(e)}(\tau_1)) = \mathbf{R}(\tau_1) = \bar{\mathbf{R}}(\tau_1) \cup \{\mathbf{R}_0 \setminus \bar{\mathbf{R}}(\tau_1 | \mathbf{R}_0, \mathbf{T}_\tau)\} = \mathbf{R}(\tau_1 | \mathbf{R}_0, \mathbf{T}_\tau) = \{R_1(\tau_1), \dots, R_{n_{\tau_1}}(\tau_1)\} = \mathbf{R}_{\tau_1}$, где $\bar{\mathbf{R}}(\tau_1) = \{\bar{R}_1(\tau_1), \dots, \bar{R}_{m_{\tau_1}}(\tau_1)\}$; $n_{\tau_1} = n_0 - m_{\tau_1} + l_{\tau_1}$. Учитывая, что $\mathbf{R}_{\tau_1} \neq \emptyset$, полагаем $s := s + 1$; $t_s := \tau_1$; $p_a^{(e)}(t_s) := p(\tau_1)$. И формируем соответствующий массиву работ \mathbf{R}_{τ_1} новый массив длительности исполнения работ $\Delta(\tau_1) = \{\Delta_1(\tau_1), \dots, \Delta_{n_{\tau_1}}(\tau_1)\} = \Delta_{\tau_1}$ для периода времени $\tau_1 = 10$. Устанавливаем $\tau := \tau_1 = 10$.

Для периодов времени $\tau \in \{10, \dots, 13\}$ реализация стратегии $U_a^{(e)} \in \mathbf{U}_0$ осуществляется аналогично процедуре, описанной для периода $\tau = 0$. А именно для каждой τ -позиции $p^{(e)}(\tau)$ и соответствующих ей массивов $\mathbf{R}^{(e)}(\tau) = \{R_1(\tau), \dots, R_{n_\tau}(\tau)\} = \mathbf{R}_\tau$ и $\Delta(\tau) = \{\Delta_1(\tau), \dots, \Delta_{n_\tau}(\tau)\} = \Delta_\tau$, $\tau \in \{10, \dots, 13\}$ формируются сетевая модель $\mathbf{WM}_\tau^{(e)}(\mathbf{R}(\tau))$, критический путь $\mathbf{R}^{(cr)}(\tau) = \{R_1^{(cr)}(\tau; \tau_1), R_2^{(cr)}(\tau; \tau_2), \dots, R_{n_\tau^{(cr)}}^{(cr)}(\tau_{n_\tau^{(cr)}-1}; \tau_{n_\tau^{(cr)}})\} = \mathbf{R}_\tau^{(cr)}$, критическое время $T_\tau^{(e)} = 16$, массив периодов времени $\mathbf{T}_\tau = \{\tau_k\}_{k \in \{0, \dots, n_\tau^{(cr)}\}} (\tau_0 = \tau)$ и календарный график $\mathbf{TG}_\tau^{(e)}(\mathbf{R}(\tau))$. На основании имеющихся данных для реализовавшейся τ_1 -позиции $p(\tau_1) = \{\tau_1, \bar{\mathbf{R}}(\tau_1 | \mathbf{R}_0, \mathbf{T}_\tau)\} \in \mathbf{P}(\tau_1)$, где $\mathbf{P}(\tau_1)$ — множество всех допустимых τ_1 -позиций; $\bar{\mathbf{R}}(\tau_1 | \mathbf{R}_0, \mathbf{T}_\tau) = \{\bar{R}_1(\tau_1), \dots, \bar{R}_{m_{\tau_1}}(\tau_1)\}$, $\tau_1 \in \mathbf{T}_\tau$, имеем $p(\tau_1) = p^{(e)}(\tau_1) = \{\tau_1, \bar{\mathbf{R}}^{(e)}(\tau_1 | \mathbf{R}_0, \mathbf{T}_\tau)\} \in \mathbf{P}(\tau_1)$ и

$$\bar{\mathbf{R}}^{(e)}(\tau_1 | \mathbf{R}_0, \mathbf{T}_\tau) = \bar{\mathbf{R}}^{(e)}(\tau_1 | \mathbf{R}_0, \mathbf{T}_\tau) = \bar{\mathbf{R}}(\tau_1 | \mathbf{R}_0, \mathbf{T}_\tau) = \{\bar{R}_1(\tau_1), \dots, \bar{R}_{m_{\tau_1}}(\tau_1)\} = \\ = \{\bar{R}_1(\tau_1), \dots, \bar{R}_{m_{\tau_1}}(\tau_1)\} = \{\bar{R}_1(\tau_1), \dots, \bar{R}_{m_{\tau_1}}(\tau_1)\}.$$

Аналогично выполнению соотношений (1) формируется множество

$$U_a^{(e)}(p^{(e)}(\tau_1)) = \mathbf{R}^{(e)}(\tau_1) = \{\mathbf{R}_0 \setminus \bar{\mathbf{R}}^{(e)}(\tau_1 | \mathbf{R}_0, \mathbf{T}_\tau)\} = \mathbf{R}^{(e)}(\tau_1 | \mathbf{R}_0, \mathbf{T}_\tau) = \{R_1(\tau_1), \dots, R_{n_{\tau_1}}(\tau_1)\} = \mathbf{R}_{\tau_1},$$

где $n_{\tau_1} = n_0 - m_{\tau_1}$. Учитывая, что $\mathbf{R}_{\tau_1} \neq \emptyset$, полагаем $s := s + 1$, $t_s := \tau_1$, $p_a^{(e)}(t_s) := p^{(e)}(\tau_1)$. И для массива работ \mathbf{R}_{τ_1} формируем новый массив длительности исполнения работ $\Delta(\tau_1) = \{\Delta_1(\tau_1), \dots, \Delta_{n_R}(\tau_1)\} = \Delta_{\tau_1}$ для периода τ_1 . Полагаем $\tau := \tau_1$.

Учитывая, что в период времени $\tau = 14$ также не происходит задержки выполнения работ-операций, для которых наиболее поздним сроком их исполнения является время $\tau_1 = 15$, после выполнения к началу периода $\tau_1 = 15$ полностью или частично работ-операций, для которых наименее ранним сроком

их исполнения является время $\tau_1 = 15$, аналогично процедуре, описанной для периода времени $\tau = 0$, и согласно (1) конструируются следующие элементы решения:

1) τ_1 -позиция ($\tau_1 = 15$) проекта $p(\tau_1) = \{\tau_1, \bar{\mathbf{R}}(\tau_1 | \mathbf{R}_0, \mathbf{T}_\tau)\} \in \mathbf{P}(\tau_1)$, $\bar{\mathbf{R}}(\tau_1 | \mathbf{R}_0, \mathbf{T}_\tau) = \{\bar{R}_1(\tau_1), \dots, \bar{R}_{m_{\tau_1}}(\tau_1)\} = \{\bar{R}_1(\tau_1), \dots, \bar{R}_{37}(\tau_1)\}$ — множество из 37 элементов ($m_{\tau_1} = 37 < n_0 = 38$); $p(\tau_1) = \{\bar{R}_1(\tau_1), \dots, \bar{R}_{37}(\tau_1)\} = p^{(e)}(\tau_1) = \{\tau_1, \{R_1^{(e)}(\tau_1), \dots, R_{37}^{(e)}(\tau_1)\}\} = \{\tau_1, \bar{\mathbf{R}}^{(e)}(\tau_1 | \mathbf{R}_0, \mathbf{T}_\tau)\} \in \mathbf{P}(\tau_1)$;

2) выходной массив исполнения стратегии

$$U_a^{(e)}(p^{(e)}(\tau_1)) = \mathbf{R}^{(e)}(\tau_1) = \{\mathbf{R}_0 \setminus \bar{\mathbf{R}}^{(e)}(\tau_1 | \mathbf{R}_0, \mathbf{T}_\tau)\} = \mathbf{R}^{(e)}(\tau_1 | \mathbf{R}_0, \mathbf{T}_\tau) = \{R_1^{(e)}(\tau_1), \dots, R_{n_{\tau_1}}^{(e)}(\tau_1)\} = \{R_1(\tau_1)\} = \{R_{38}(0)\} = \mathbf{R}_{\tau_1}, n_{\tau_1} = n_0 - m_{\tau_1} = 38 - 37 = 1.$$

Учитывая, что $\mathbf{R}_{\tau_1} \neq \emptyset$, полагаем $s := s + 1$, $t_s := \tau_1$, $p_a^{(e)}(t_s) := p^{(e)}(\tau_1)$;

3) для массива $\mathbf{R}^{(e)}(\tau_1) = \{R_1(\tau_1)\} = \{R_{38}(0)\} \mathbf{R}_{\tau_1}$ получаем новый массив длительности $\Delta(\tau_1) = \{\Delta_1(\tau_1)\} = \{\Delta_{38}(0)\} = \Delta_{\tau_1}$ для периода $\tau = \tau_1$; фиксируем $\tau := \tau_1 = 15$.

Продолжая адаптивное управление процессами бизнес-планирования, в результате решения новой задачи календарного планирования для $\tau = 15$ и $\mathbf{R}(\tau) = \{R_1(\tau)\} = \{R_{38}(0)\} = \mathbf{R}_{\tau}$ находим новый критический путь $\mathbf{R}^{(cr)}(\tau) = \{R_1^{(cr)}(15; 16)\} = \mathbf{R}_{\tau}^{(cr)}$, $n_{\tau}^{(cr)} = 1$, который содержит одну работу $\{R_{38}(0)\}$ и служит частью предыдущего критического пути (см. рис. 7), а также новый календарный график, являющийся частью предыдущего графика (см. рис. 8). Этим данным отвечает новый массив периодов времени $\mathbf{T}_{\tau} = \{\tau_k\}_{k \in \{0, \dots, n_{\tau}^{(cr)}\}} = \{\tau_k\}_{k \in \{0, 1\}} = \{15; 16\} = \{\tau_0, \tau_1\}$, где $\tau_0 = \tau = 15$, соответствующий событиям $\{26, 27\}$ модели (см. рис. 7).

Далее в период $\tau = 15$ не происходит задержки работ, для которых наиболее поздним сроком исполнения является критическое время $T_{\tau}^{(e)} = \tau_1 = 16$. Тогда после выполнения к началу периода $\tau_1 = 16$ полностью или частично работ, для которых крайним сроком исполнения является время $\tau_1 = 16$, аналогично процедуре, описанной для периода времени $\tau = 0$, конструируются элементы решения:

1) τ_1 -позиция ($\tau_1 = 16$) проекта $p(\tau_1) = \{\tau_1, \mathbf{R}(\tau_1 | \mathbf{R}_0, \mathbf{T}_\tau)\} \in \mathbf{P}(\tau_1)$, $\mathbf{R}(\tau_1 | \mathbf{R}_0, \mathbf{T}_\tau) = \{\bar{R}_1(\tau_1), \dots, \bar{R}_{m_{\tau_1}}(\tau_1)\} = \{\bar{R}_1(\tau_1), \dots, \bar{R}_{38}(\tau_1)\}$ — множество из 38 элементов, $m_{\tau_1} = 38 = n_0 = 38$; $p(\tau_1) = \{\bar{R}_1(\tau_1), \dots, \bar{R}_{38}(\tau_1)\} = p^{(e)}(\tau_1) = \{\tau_1, \{R_1^{(e)}(\tau_1), \dots, R_{38}^{(e)}(\tau_1)\}\} = \{\tau_1, \bar{\mathbf{R}}^{(e)}(\tau_1 | \mathbf{R}_0, \mathbf{T}_\tau)\} \in \mathbf{P}(\tau_1)$;

2) выходной массив реализации стратегии $U_a^{(e)}(p^{(e)}(\tau_1)) = \mathbf{R}^{(e)}(\tau_1) = \{\mathbf{R}_0 \setminus \bar{\mathbf{R}}^{(e)}(\tau_1 | \mathbf{R}_0, \mathbf{T}_\tau)\} = \hat{\mathbf{R}}^{(e)}(\tau_1 | \mathbf{R}_0, \mathbf{T}_\tau) = \{\hat{R}_1^{(e)}(\tau_1), \dots, \hat{R}_{n_{\tau_1}}^{(e)}(\tau_1)\} = \emptyset = \mathbf{R}_{\tau_1}, n_{\tau_1} = n_0 - m_{\tau_1} = 38 - 38 = 0$.

Тогда на основании стратегии $U_a^{(e)} \in \mathbf{U}_0$, $\bar{\mathbf{R}}^{(e)}(\tau_1 | \mathbf{R}_0, \mathbf{T}_\tau) = \{R_1^{(e)}(\tau_1), \dots, R_{38}^{(e)}(\tau_1)\} = \{\bar{R}_1(\tau_1), \dots, \bar{R}_{38}(\tau_1)\} = \{R_1(0), \dots, R_{38}(0)\}$, $m_{\tau_1} = n_0 = 38$, $\mathbf{R}^{(e)}(\tau_1) = \mathbf{R}_{\tau_1} \neq \emptyset$, следует, что к периоду времени $T_{\tau}^{(e)} = \tau + 1 = \tau_1 = 16$ выполнены все работы бизнес-плана. Следовательно, процесс осуществления стратегии $U_a^{(e)} \in \mathbf{U}_0$ считается выполненным, устанавливаем $s := s + 1$, $t_s := \tau_1 = 16$, $p_a^{(e)}(t_s) := p^{(e)}(\tau_1)$ и переходим к построению итоговых результатов.

На четвертом этапе формируется выходная информация, соответствующая реализации процесса оптимизации адаптивного управления бизнес-проектом, т.е. описание стратегии $U_a^{(e)} \in \mathbf{U}_0$ на основе следующих результатов: $\mathbf{R}_a^{(e)} = \mathbf{R}(0) = \{R_1(0), \dots, R_{n_0}(0)\} = \mathbf{R}_0 = \{R_1(0), \dots, R_{38}(0)\}$ — входной набор работ проекта; $\mathbf{WM}_a^{(e)} = \mathbf{WM}_{\tau}^{(e)}(\mathbf{R}(0))$ — оптимальная сетевая модель; $p_a^{(e)}(t_k)$ — набор t_k -позиций, $k \in \{1, \dots, s\}$. Для оптимального адаптивного управления бизнес-проектом нужна стратегия $U_a^{(e)}$ с оптимальным временем осуществления бизнес-проекта, равным $\mathbf{T}_a^{(e)} = T_{\tau}^{(e)} = T_{15}^{(e)} = 16$.

Отметим, что исполнение данного бизнес-проекта в соответствии с календарным графиком, сформированным для периода $\tau = 0$, приведет к пересечению времени реализации, входящей в него работы $R_{27}(\tau_1) = R_{27}(0)$, с работой $\bar{R}_7^{(3)}(\tau_1) = \bar{R}_7^{(3)}(0)$, которая является оставшейся для исполнения частью исходной работы $R_7(\tau_1) = R_7(0)$. Такая ситуация возникнет, если не применять используемый метод оптимизации уже в период времени $\tau = \tau_1 = 8$, когда еще не закончилась в полном объеме работа $R_7(\tau_1) = \{\bar{R}_7^{(1)}(\tau_1) \cup \bar{R}_7^{(2)}(\tau_1) \cup \bar{R}_7^{(3)}(\tau_1) \cup \bar{R}_7^{(3)}(\tau_1)\} = R_7(0)$, а выполнена только ее часть $\bar{R}_7(\tau_1) = \{\bar{R}_7^{(1)}(\tau_1) \cup \bar{R}_7^{(2)}(\tau_1) \cup \bar{R}_7^{(3)}(\tau_1)\} \neq R_7(0)$. Это является неприемлемым по условиям его реализации и приведет к неисполнению бизнес-проекта в целом.

Рассмотренное решение модельной задачи бизнес-планирования позволяет сделать вывод об эффективности использования нового метода адаптивной оптимизации процесса управления

бизнес-планированием, который основан на реализации принципа обратной связи управленческих воздействий на возникающие возмущения, и получить оптимальное время для исполнения бизнес-проекта в целом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Адаптивные системы подразумевают приспособление процесса управления к реализациям состояния объекта управления, которое необходимо, если характеристики объекта подвергаются внешним/внутренним изменениям (воздействиям).

В статье рассмотрена задача оптимизации бизнес-планирования в отрасли ресторанного бизнеса, которая показывает возможности адаптивного сетевого моделирования. Для реализации стратегии оптимизации адаптивного управления используются наблюдения, получаемые в процессе работы модели. Управление по правилам обратной связи является важной особенностью оптимизации адаптивного управления бизнес-проектом при формировании стратегии управления.

Недостаток априорной информации компенсируется применением нового метода оптимизации адаптивного управления процессами бизнес-планирования на основании коррекции сетевой модели, способствующей значительному снижению влияния имеющейся неопределенности.

Дальнейшее совершенствование оптимизации бизнес-планирования с помощью методов сетевого планирования и управления возможно на основе создания интеллектуальной компьютерной системы поддержки принятия решений в рассматриваемой отрасли. Ее разработка осуществляется путем моделирования знаний на базе продукций, нейронных сетей и моделей машинного обучения. Для оценки потенциала различных бизнес-проектов применение такой системы может стать эффективным инструментальным средством.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Ахмадеев Б.А., Макаров В.Л. (2019). Система оценки проектов на основе комбинированных методов компьютерной оптимизации // *Экономика и математические методы*. Т. 55. № 2. С. 5–23. [Akhmadeev B.A., Makarov V.L. (2019). Project assessment system based on combined methods of computer optimization. *Economics and Mathematical Methods*, 55, 2, 5–23 (in Russian).]
- Клейнер Г.Б., Рыбачук М.А. (2017). Системная сбалансированность экономики. М.: Издательский дом «Научная библиотека». 320 с. [Kleiner G.B., Rybachuk M.A. (2017). *System balance of the economy*. Moscow: Nauchnaja biblioteka. 320 p. (in Russian).]
- Кофман А., Дебазей Г. (1968). Сетевые методы планирования и их применение. М.: Прогресс. 182 с. [Kofman A., Debazeu G. (1968). *Network planning methods and their application*. Moscow: Progress. 182 p. (in Russian).]
- Чертовской В.Д. (2013). Информационная поддержка адаптивного автоматизированного управления производством // *Прикладная информатика*. № 1 (43). С. 11–17. [Chertovskoy V.D. (2013). Information support for adaptive automated production control. *Applied Informatics*, 1 (43), 11–17 (in Russian).]
- Шориков А.Ф. (1997). Минимаксное оценивание и управление в дискретных динамических системах. Екатеринбург: Изд. Урал. гос. ун-та. 242 с. [Shorikov A.F. (1997). *Minimax estimation and control in discrete-time dynamical systems*. Ekaterinburg: Ural State University Publisher. 242 p. (in Russian).]
- Шориков А.Ф., Буценко Е.В. (2017). Прогнозирование и оптимизация результата управления инвестиционным проектированием. М.: URSS-ЛЕНАНД. 272 с. [Shorikov A.F., Butsenko E.V. (2017). *Forecasting and optimization of the investment projecting control result*. Moscow: URSS-LENAND. 272 p. (in Russian).]
- Шориков А.Ф., Буценко Е.В. (2020). Метод сетевого экономико-математического моделирования оптимизации адаптивного управления инвестиционным проектированием // *Journal of Applied Economic Research*. Т. 19. № 1. С. 97–123. [Shorikov A.F., Butsenko E.V. (2020). Method of network economic-mathematical modeling of adaptive control optimization investment projecting. *Journal of Applied Economic Research*, 19, 1, 97–123 (in Russian).]
- Agulhari C., Lacerda M. (2019). Observer-based state-feedback control design for LPV periodic discrete-time systems. *European Journal of Control*, 49, 1–14.
- Astolfi A. (2006). *Nonlinear and adaptive control, tools and algorithms for the user*. London: Imperial College Press. 313 p.
- Astroem K.J., Wittenmark B. (2008). *Adaptive control*. 2nd edition. Dover Publications. 590 p.
- Barabanov N., Ortega R. (2018). On the need of projections in input-error model reference adaptive control. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 32, 3, 403–411.
- Benner A.H., Drenick R. (1955). An adaptive servo system. *IRE Convention Record*, 4, 8–14.

- Benosman M.** (2018). Model-based vs data-driven adaptive control: An overview. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 32, 5, 753–776.
- Bundy A.** (ed.) (1997). *Artificial intelligence techniques*. Berlin: Springer Verlag.
- Deng L., Chen Y.** (2017). Optimal control of uncertain systems with jump under optimistic value criterion. *European Journal of Control*, 38, 7–15.
- Draper C.S., Li Y.T.** (1951). *Principles of optimizing control systems and an application to the internal combustion engine*. American Society of Mechanical Engineers (ASME) Publication, 160–168.
- Farrell J.A., Polycarpou M.M.** (2006). *Adaptive approximation based control. Unifying Neural, Fuzzy and Traditional Adaptive Approximation Approaches*. Hoboken: John Wiley. 432 p.
- Huang M., Gao W., Jiang Z.P.** (2019). Connected cruise control with delayed feedback and disturbance: An adaptive dynamic programming approach. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 33, 2, 356–370.
- Landau I.D., Lozano R., M'Saad M., Karimi A.** (2011). *Adaptive control: Algorithms, analysis and applications*. London: Springer. 610 p.
- Latrech Ch., Kchaou M., Guéguen H.** (2018). Networked non-fragile H^∞ static output feedback control design for vehicle dynamics stability: A descriptor approach. *European Journal of Control*, 40, 13–26.
- Ma H.** (2019). Infinite horizon optimal control of mean-field forward-backward delayed systems with Poisson jumps. *European Journal of Control*, 46, 14–22.
- Moustakis N., Yuan S., Baldi S.** (2018). An adaptive design for quantized feedback control of uncertain switched linear systems. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 32, 9, 665–680.
- Su H., Zhang W.** (2019). Finite-time prescribed performance adaptive fuzzy fault-tolerant control for nonstrict-feedback nonlinear systems. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 33, 9, 1407–1424.
- Tsien H.S., Serdengecti S.** (1955). Analysis of peak-holding optimizing control. *Journal of the Aeronautical Sciences*, 22 (8), 561–570.

Optimization of adaptive network economic and mathematical modeling of business planning process control

© 2021 A.F. Shorikov, E.V. Butsenko

A.F. Shorikov,

Institute of Economics, the Ural Branch of the RAS, N.N. Krasovskii Institute of Mathematics and Mechanics, the Ural Branch of the RAS, Ekaterinburg, Russia; e-mail: afshorikov@mail.ru

E.V. Butsenko,

Ural State University of Economics, Ekaterinburg, Russia; e-mail: evl@usue.ru

Received 23.11.2020

The work was carried out in accordance with the Research plans of the Institute of Economics and of the N.N. Krasovskii Institute of Mathematics and Mechanics, the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

Abstract. The article is devoted to the application of economic and mathematical models of business planning management based on the use of the feedback principle. As the objective function (evaluation toolkit) of the task, the value of the execution time of the entire business project, which must be minimized, is considered. To solve this problem, it is proposed to form a class of admissible strategies for optimal adaptive control of the implementation process; as well as a specific business project using network economic and mathematical modeling is worked out. Within the limits of these strategies, the method of achieving optimal self-adjusting control of business planning processes is determined, the optimal execution time and the optimal timetable for the implementation of the project are determined. The main feature of the proposed new method is the ability to take into account the real conditions for the implementation works of the concrete project, which makes it possible to timely adjust the process of management of business planning and prevent disruptions in its implementation. This method also serves as the basis for constructing numerical algorithms for developing and creating the automated systems for realization of optimal adaptive control of business planning processes. The results obtained are illustrated on a specific business project for opening a public catering enterprise and show a high degree of efficiency in using the new method.

Keywords: business planning, business project, economic and mathematical modeling, control strategy, network model, control optimization, adaptive control, feedback control, public catering.

JEL Classification: C02, C44, G31.5

DOI: 10.31857/S042473880016413-3