

Я.Е. Львович, А.В. Питолин, С.О. Сорокин  
**ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МНОГОАСПЕКТНОЙ  
ЦИФРОВОЙ СРЕДЫ СИСТЕМЫ ОДНОРОДНЫХ ОБЪЕКТОВ  
НА ОСНОВЕ ПРОЦЕДУР ДЕКОМПОЗИЦИИ И АГРЕГАЦИИ**

*Воронежский институт высоких технологий  
Воронежский государственный технический университет  
Министерство экономического развития Российской Федерации*

*В статье рассматривается функционирование системы однородных объектов в условиях активной цифровизации. Показано, что интегральной структурой, объединяющей все аспекты цифровой трансформации, является многоаспектная цифровая среда, которая требует постоянного совершенствования по мере развития новых инструментов цифровизации. Возникающая задача проектирования такой среды носит оптимизационный характер. Предложено систему оптимального проектирования построить на основе сочетания нисходящего и восходящего процессов принятия проектных решений. Основой нисходящего проектирования является формализация процесса декомпозиции многоаспектной цифровой среды с использованием модели бинарного дерева. Процедуры восходящего проектирования базируются на моделях и алгоритмах многоальтернативной оптимизации с определением множества доминирующих вариантов на основе переходной матрицы марковской цепи и применения экспертного оценивания.*

**Ключевые слова:** оптимальное проектирование, цифровизация, бинарное дерево, многоальтернативная оптимизация.

В [1] рассмотрен механизм интеграции множества объектов  $O_i = (i = \overline{1, I})$ , характеризующихся однородным набором показателей эффективности их функционирования  $y_{ij_1} (i = \overline{1, I}, j_1 = \overline{1, J_1})$ . Управляющий центр оценивает, в какой степени значения этих показателей соответствуют нормативным требованиям и требованиям опережающего развития. Показатели  $y_{ij_1} (i = \overline{1, I}, j_1 = \overline{1, J_1})$  определяют эффективность внутрисистемного функционирования (интрафункциональность). С другой стороны однородные объекты взаимодействуют по результатам своей деятельности с объектами  $O_d = (d = \overline{1, D})$  внешней среды. Для оценки интерфункциональных аспектов взаимодействия используются показатели  $y_{ij_2} (i = \overline{1, I}, j_2 = \overline{1, J_2})$ . В зависимости от уровня показателей  $y_{ij_1}$  управляющий центр выделяет ресурсное обеспечение  $r_i^1$ , исходя из объема интегрального ресурса. Дополнительно может быть выделено ресурсное обеспечение, поощряющее эффективное взаимодействие объекта  $O_i$  с объектом внешней среды  $O_d - r_{d_i}^2$ .

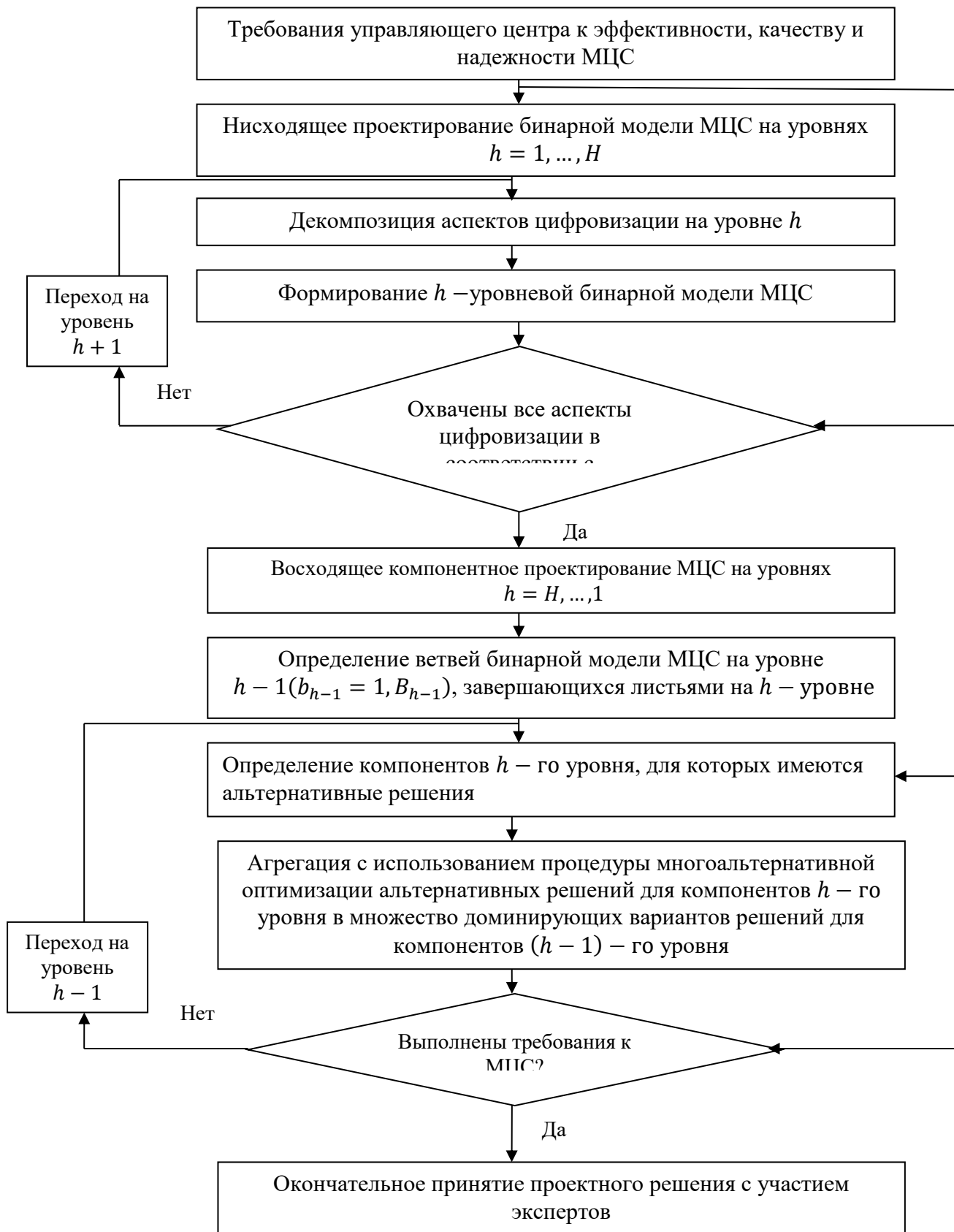


Рисунок 1- Структура системы оптимального проектирования МЦС

Таким образом, однородные объекты характеризуются целым рядом аспектов функционирования. Для управления результативностью их функционирования, ресурсным обеспечением требуется анализировать большие объемы данных, наиболее эффективной формой представления которых, является многоаспектная цифровая среда (МЦС). МЦС обеспечивает цифровую трансформацию характеристик всех аспектов функционирования однородных объектов и их взаимодействия с управляющим центром и внешней среды. В этом случае МЦС представляет собой сложную систему с  $h = \overline{1, N}$  аспектными уровнями. Постоянное развитие инструментов цифровизации требует проектирования обновленной МЦС за счет исключения неэффективных реализаций компонентов и включения их инновационных реализаций на альтернативной основе. Проектирование в таком случае направлено на выбор инструментов цифровой трансформации на каждом  $h$  – м уровне. Иерархичность и связанность уровней, необходимость удовлетворения требований управляющего центра к эффективности, качеству и надежности МФЦ определяют оптимизационный характер принятия проектных решений [2].

Предлагается реализовать процесс оптимального проектирования на основе последовательного применения процедур декомпозиции и агрегации. При этом декомпозиция интерпретируется как нисходящее проектирование путем формирования многоуровневой модели МФЦ, а агрегация – как восходящее проектирование путем выбора инструментов реализации элементов каждого уровня МФЦ. В качестве приемлемой конструкции многоуровневой модели МФЦ рассматривается бинарное дерево [3], а метода агрегации – метод оптимизации [2]. Сочетание процедур декомпозиции и агрегации в рамках системы оптимального проектирования МФЦ представлено на Рисунке 1.

При нисходящем проектировании бинарной модели МЦС используем классификационную схему, приведенную в [1] и описания ряда решений по цифровой трансформации [4,5]. В этом случае бинарная декомпозиция аспектов цифровизации осуществляется на следующих условиях:

$h = 1$  – МЦС;

$h = 2$  – интерфункциональные и интрафункциональные аспекты;

$h = 3$  – интерфункциональные аспекты: аспекты взаимодействия с управляющим центром и внешней средой;  
интрафункциональные аспекты: технологические и когнитивные аспекты;

$h = 4$  – все аспекты  $h = 2$ : требующие мониторингового оценивания и определяющие распределение ресурсного обеспечения;

- $h = 5$  – требующие мониторингового оценивания:  
аспекты оценивания эффективности деятельности однородного объекта и аспекты административного контроля, определяющие распределение ресурсного обеспечения: на функционирование и развитие однородного объекта;
- $h = 6$  – аспекты оценивания эффективности деятельности: количественные и визуальные,  
аспекты административного контроля: документарные и отраженные в информационных ресурсах;
- $h = 7$  – количественные аспекты оценивания эффективности: пороговые и интегральные,  
визуальные аспекты: диаграммные и картографические.
- Структура бинарной модели МЦС представлена на Рисунке 2.

Обратим внимание, что соответствующее этим уровням бинарное дерево завершается листьями на уровне  $h = 7$  по 8-ми ветвям на уровне  $h = 6$  ( $b = 8$ ), на уровне  $h = 6$  – по 8-ми ветвям на уровне  $h = 5$  ( $b_5 = 8$ ), на уровне  $h = 5$  – по 4-м ветвям на уровне  $h = 4$  – ( $b_4 = 4$ ), на уровнях  $h = 1, 2, 3, 4$ , нет завершающихся листьями ветвей. Охарактеризованная структура бинарного дерева влияет на формирование множеств альтернативных вариантов при решении оптимизационной задачи агрегации в случае восходящего проектирования. Рассмотрим постановки и алгоритмы решения оптимизационных задач агрегации, начиная с уровня  $h = 7$ .

Пусть на уровне  $h = 7$  имеются альтернативные решения для листьев ветвей «количественные аспекты». Введем следующие обозначения:

$t_{1b} = \overline{1T_{1b_6}}$  – нумерационное множество альтернативных вариантов по левому листу ветви «количественные аспекты» ( $b_6 = 1, 3, 5, 7$ );

$t_{2b} = \overline{1T_{2b}}$  – нумерационное множество альтернативных вариантов по правому листу ветви «визуальные аспекты» ( $b_6 = 2, 4, 6, 8$ ).

Множество альтернативных вариантов порогового оценивания, диаграммной визуализации рассмотрено в [6], интеграционного оценивания – в [7], картографической визуализации в [8].

Агрегация этих множеств по ветвям с номером  $b = \overline{1, 8}$  должна обеспечивать наилучший вариант решения в соответствии с требованиями управляющего центра к количественному и визуальному оцениванию эффективности деятельности однородного объекта.

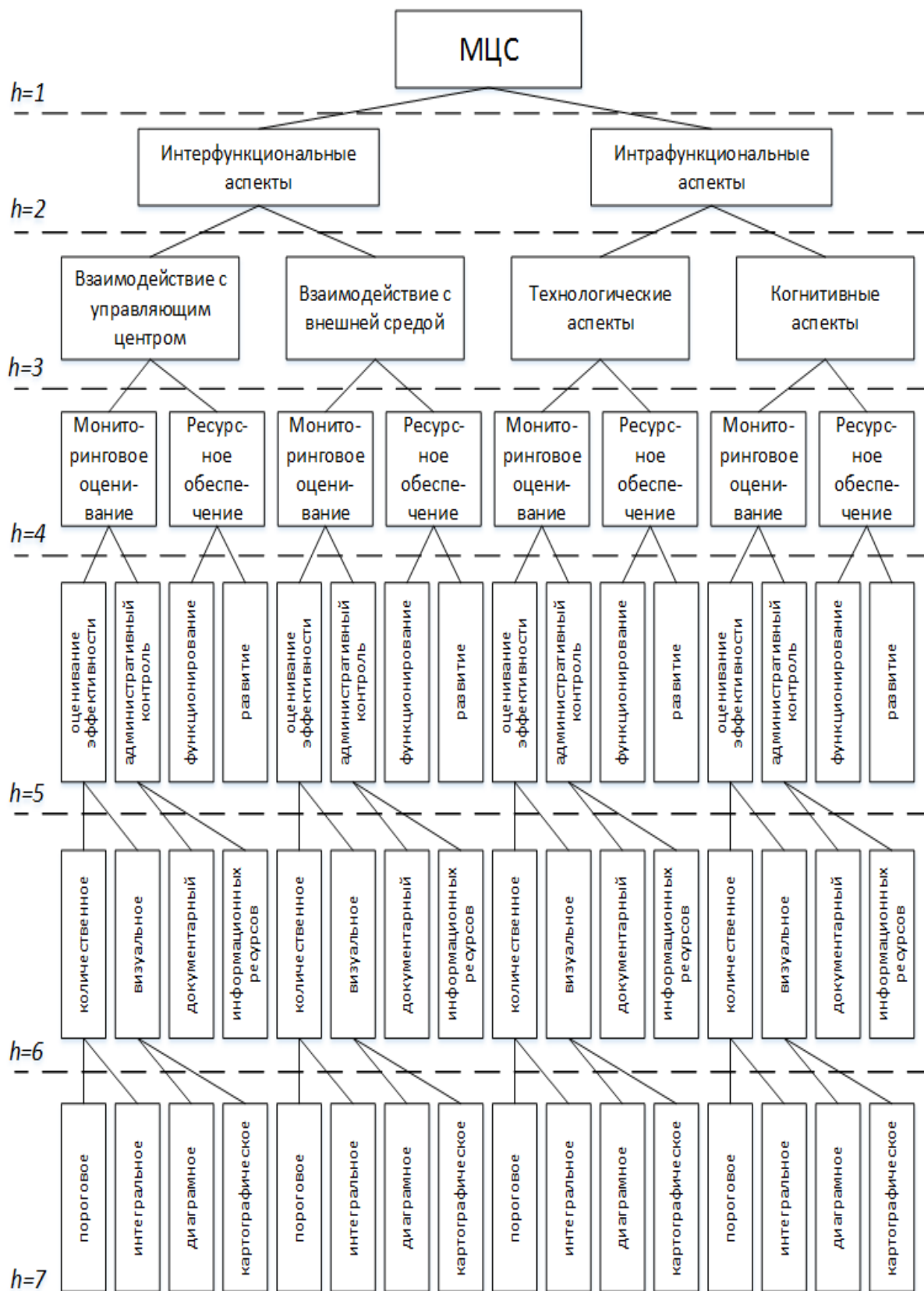


Рисунок 2 - Структура бинарной модели МЦС

Для формирования оптимизационной модели агрегации введем следующие альтернативные переменные

$$x'_{1b_6} = \begin{cases} 1, \text{ если в соответствии с требованиями выбирается} \\ \text{альтернативный вариант } t'_{1b_6} \in \overline{1, T_{1b_6}}, \\ 0, \text{ в противном случае,} \end{cases} \quad (1)$$

$$x'_{2b_6} = \begin{cases} 1, \text{ если в соответствии с требованиями выбирается} \\ \text{альтернативный вариант } t'_{2b_6} \in \overline{1, T_{2b_6}}, \\ 0, \text{ в противном случае,} \end{cases} \quad (2)$$

$$t'_{2b} = \overline{1, T_{2b}}.$$

В зависимости от значений переменных (1), (2) при расчете количественных показателей  $F_i (i = \overline{1, I})$ , характеризующих требования надежности, безопасности, производительности, стоимости и т.п., используются значения соответствующих характеристик  $f_i$  варианта, для которого  $x_{t'b_6} = 1, x_{x't'b_6} = 1$ , то есть

$$F_i = \Psi_i(f_i(x_{t'b_6}, x_{x't'b_6})). \quad (3)$$

При постановке задачи оптимальной агрегации показатели (3) разделяются на две группы. Первая группа – те, к которым предъявляются экстремальные требования  $i_1 = \overline{1, I_1}$ , вторая – те, к которым предъявляются граничные требования  $i_2 = \overline{1, I_2}$  [9]. Задача оптимизации на множестве оптимизируемых переменных (1), (2) запишется следующим образом:

$$F_{i_1} = \Psi_{i_1}(f_{i_1}(x_{t'_1 b_6}, x_{t'_2 b_6})) \rightarrow \text{extr}, i_1 = \overline{1, I_1},$$

$$F_{i_2} = \Psi_{i_2}(f_{i_2}(x_{t'_1 b_6}, x_{t'_2 b_6})) \leq b_{i_2}, i_2 = \overline{1, I_2}, I_1 \cup I_2 = I,$$

$$x_{t'_1 b_6} = \begin{cases} 1, t'_{1b_6} = \overline{1, T_{1b_6}}, \\ 0, \end{cases} \quad (4)$$

$$x_{t'_2 b_6} = \begin{cases} 1, t'_{2b_6} = \overline{1, T_{2b_6}}, \\ 0, \end{cases}$$

Предлагается с использованием оптимизационной модели (4) осуществлять направленный рандомизированный поиск по случайным реализациям переменных (1), (2) с распределениями [2]

$$P(\tilde{x}_{t'_1 b_6} = 1) = P_{x_{t'_1 b_6}}, P(\tilde{x}_{t'_1 b_6} = 0) = q_{x_{t'_1 b_6}}; \quad (5)$$

$$P(\tilde{x}_{t_2 b_6} = 1) = P_{x_{t_2 b_6}}, P(\tilde{x}_{t_2 b_6} = 0) = q_{x_{t_2 b_6}},$$

где  $P(\cdot)$  – обозначение вероятности события;

$\tilde{x}$  – обозначение случайных реализаций переменных;

$$\tilde{x} = \begin{cases} 1, & \text{если } p_x \leq \tilde{\xi}, \\ 0, & \text{в противном случае;} \end{cases}$$

$\tilde{\xi}$  – значения псевдослучайных чисел, равномерно распределенных на интервале  $[0,1]$  [10].

Значения вероятностей (5) меняются на каждой  $k$  – й итерации поисковой процедуры с учетом случайных вариаций, которые определяются условиями оптимизационной модели (4) [2]. Итерационный рандомизированный поиск будем интерпретировать как случайное блуждание, отвечающее конечной марковской цепи с переменной переходной матрицей [11], размерность которой определяется числом комбинаторных вариантов  $T_{b_6} = T_{1b_6} T_{2b_6}$ . В [2] обоснована регулярность рассматриваемой марковской цепи и возможность вычисления вероятностей вариантов  $t_{b_6} = \overline{1, T_{b_6}}$  при конечном числе итераций  $k = K$ .

$$P_{t_{b_6}}^K = \prod_{x_{t_1 b_6}=1} P_{x_{t_1 b_6}}^K \prod_{x_{t_1 b_6}=0} q_{x_{t_1 b_6}}^K \prod_{x_{t_2 b_6}=1} P_{x_{t_2 b_6}}^K \prod_{x_{t_2 b_6}=0} q_{x_{t_2 b_6}}^K, t_{b_6} = \overline{1, T_{b_6}}. \quad (6)$$

Далее с привлечением экспертных оценок [12] фиксируются 5-7 доминирующих вариантов агрегации, что определяет число альтернативных вариантов решений для узлов «количественное», «визуальное» на уровне  $h = 6$ , входящих в ветви  $b_6$ , которые завершаются листьями на уровне  $h = 7$  и определяют альтернативы агрегации в узлы «оценивание эффективности» на уровне  $h = 5$ . Обозначим их следующим образом

$t_{1b_5} = \overline{1, T_{1b_5}}$  – нумерационное множество альтернативных вариантов по ветви «количественное» на уровне  $h = 5$  ( $b_5 = 1,5,9,13$ );

$t_{2b_5} = \overline{1, T_{2b_5}}$  – нумерационное множество альтернативных вариантов по ветви «административный контроль» на уровне  $h = 5$  ( $b_5 = 2,6,10,14$ ).

Однако, наряду с узлами на уровне  $h = 6$  имеются листья «документарный», «информационные ресурсы» с соответствующими нумерационными множествами альтернативных вариантов:

$t_{3b_5} = \overline{1, T_{3b_5}}$  – нумерационное множество по левому листу ветви «административный контроль» на уровне  $h = 5$  ( $b_5 = 3,7,11,15$ );

$t_{4b_5} = \overline{1, T_{4b_5}}$  – нумерационное множество по правому листу ветви «административный контроль» на уровне  $h = 5$  ( $b_5 = 4,8,12,16$ ).

Поэтому оптимизационная модель (4) агрегации на уровне  $h = 5$  будем включать следующие альтернативные переменные для узла «оценивание эффективности»:

$$x_{t'_1 b_5} = \begin{cases} 1, \\ 0, \end{cases} t_{t'_1 b_5} = \overline{1, T_{1b_5}}; \quad x_{t'_2 b_5} = \begin{cases} 1, \\ 0, \end{cases} t_{t'_2 b_5} = \overline{1, T_{2b_5}};$$

а для узла «административный контроль»:

$$x_{t'_3 b_5} = \begin{cases} 1, \\ 0, \end{cases} t_{t'_3 b_5} = \overline{1, T_{3b_5}}; \quad x_{t'_4 b_5} = \begin{cases} 1, \\ 0, \end{cases} t_{t'_4 b_5} = \overline{1, T_{4b_5}}.$$

Продолжая восходящее проектирование на основе оптимизационной модели (4) и процедуры направленного рандомизированного поиска с определением доминирующих вариантов по значениям вероятностей (6) и использованием экспертного оценивания получим набор рациональных решений на каждом уровне  $h = 7, 6, 5, \dots, 1$ .

Таким образом разработан оптимизационный подход к проектированию многоаспектной цифровой среды системы однородных объектов, позволяющий на основе требований управляющего центра к эффективности, качеству и надежности функционирования МЦС обеспечить организацию двух процессов принятия проектных решений:

нисходящее проектирование, которое основано на декомпозиции МЦС на уровнях, определяющих различные аспекты цифровой трансформации характеристик функционирования системы однородных объектов, в виде модели бинарного дерева;

восходящее проектирование, которое базируется на модели бинарного дерева и выполняет процедуру агрегации ее компонентов путем последовательной многоальтернативной оптимизации на множестве переменных, характеризующих альтернативные решения с нижнего до верхнего уровня.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Сорокин С.О. Оптимизационное моделирование функционирования системы однородных объектов в многоаспектной цифровой среде//Моделирование, оптимизация и информационные технологии.- 2018.-Том6,№3-С.153-164.
2. Львович Я.Е. Многоальтернативная оптимизация: теория и приложения.- Воронеж: Издательский дом «Кварта».-2006.-428 с.
3. Абрамян М.Э. Бинарные деревья: задачи, решения и указания. Ростов на Дону.- 2009.-71 с.
4. Карелина И.Г. Мониторинг деятельности образовательных организаций – инициатива системных изменений в высшем образовании/И.Г.Карелина, А.Б.Соболев, С.О.Сорокин// Высшее образование сегодня.-2015.-№6.-4.1.-С.37-46.



5. Карелина И.Г. Мониторинг деятельности образовательных организаций – инициатива системных изменений в высшем образовании/И.Г.Карелина, А.Б.Соболев, С.О.Сорокин// Высшее образование сегодня.-2015.-№6.-4.2.-С.55-61.
6. Микрюков В.Н. Автоматизация формирования аналитических отчетов на основных данных мониторинга деятельности организаций высшего образования/В.Н.Микрюков, В.П.Поневаж, А.Н.Серегин, С.О.Сорокин// Высшее образование.-2015.-№2.-С.70-75.
7. Каширина И.Л. Интегральное оценивание сетевых систем с кластерной структурой/И.Л.Каширина, Я.Е.Львович, С.О.Сорокин// Экономика и менеджмент систем управления.-2015.-№1.3(15).-С.330-337.
8. Микрюков В.Н. Исследование возможностей геоинформационных систем для анализа деятельности образовательных организаций/ В.Н.Микрюков, В.П.Поневаж, А.Н.Серегин, С.О.Сорокин// Высшее образование сегодня.-2015.-№1.-С.34.39.
9. Львович И.Я. Информационные технологии моделирования и оптимизации: краткая теория и приложения/ И.Я.Львович, Я.Е.Львович, В.Н.Фролов.- ИПЦ «Научная книга».-2016. – 444 с.
10. Соболев И.М. Численные методы Монте-Карло.- М.: Наука.- 1973.- 312 с.
11. Кемени Дж., Снелл Дж. Конечные цепи Маркова: Пер. с англ./ Под ред. А.А.Юшкевича.-М.: Наука.-1970.-272 с.
12. Львович Я.Е. Принятие решений в экспертно-виртуальной среде/Я.Е.Львович, И.Я.Львович.-Воронеж: ИПЦ «Научная книга». – 2010. – 140 с.

Y.E. Lvovich, A.V. Pitolin, S.O. Sorokin

**MULTI-ASPECT DIGITAL ENVIRONMENT DESIGN OPTIMIZATION  
OF HOMOGENEOUS OBJECTS SYSTEM BASED ON THE  
PROCEDURES OF DECOMPOSITION AND AGGREGATION**

*Voronezh Institute of High Technologies, Voronezh, Russian Federation.*

*Voronezh state technical University, Voronezh, Russian Federation*

*The Ministry of economic development of the Russian Federation*

*This article examines the functioning of the homogeneous objects system in the conditions of active digitalization. It is shown that the integral structure uniting all aspects of digital transformation is a multi-aspect digital environment, which requires constant improvement as new tools of digitalization develops. The arising task of designing that sort of an environment has an optimization nature. The optimal design system is proposed to build on the basis of a combination of descending and ascending processes of decision-making. The descending design basis is the formalization of the decomposition process of a multidimensional digital environment using a binary tree model. The ascending design procedures are based on*

*models and algorithms of multi-alternative optimization with the determination of the dominant variants set based on the transition matrix of the Markov chain and the use of expert evaluation.*

**Keywords:** optimal design, digitalization, binary tree, multi-alternative optimization.

## REFERENCES

1. Sorokin S.O. Optimizatsionnoe modelirovanie funktsionirovaniya sistemy odnorodnykh ob"ektov v mnogoaspektnoy tsifrovoy srede//Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii.-2018.-Vol.6, No.3 - pp.153-164.
2. L'vovich Ya.E. Mnogoal'ternativnaya optimizatsiya: teoriya i prilozheniya.- Voronezh: Izdatel'skiy dom «Kvarta».-2006.-428 .
3. Abramyan M.E. Binarnye derev'ya: zadachi, resheniya i ukazaniya. Rostov na Donu.- 2009.-71 p.
4. Karelina I.G. Monitoring deyatel'nosti obrazovatel'nykh organizatsiy – initsiativa sistemnykh izmeneniy v vysshem obrazovanii/I.G.Karelina, A.B.Sobolev, S.O.Sorokin// Vysshee obrazovanie segodnya.-2015.- No.6.- 4.1.-pp.37-46.
5. Karelina I.G. Monitoring deyatel'nosti obrazovatel'nykh organizatsiy – initsiativa sistemnykh izmeneniy v vysshem obrazovanii/I.G.Karelina, A.B.Sobolev, S.O.Sorokin// Vysshee obrazovanie segodnya.-2015.- No.6.- 4.2.-pp.55-61.
6. Mikryukov V.N. Avtomatizatsiya formirovaniya analiticheskikh otchetov na osnovnykh dannykh monitoringa deyatel'nosti organizatsiy vysshego obrazovaniya/V.N.Mikryukov, V.P.Ponevazh, A.N.Seregin, S.O.Sorokin// Vysshee obrazovaniye.-2015. No.2.-pp.70-75.
7. Kashirina I.L. Integral'noe otsenivanie setevykh sistem s klasternoy strukturoy/I.L.Kashirina, Ya.E.L'vovich, S.O.Sorokin// Ekonomika i menedzhment sistem upravleniya.-2015.- No.1.3(15).-pp.330-337.
8. Mikryukov V.N. Issledovanie vozmozhnostey geoinformatsionnykh sistem dlya analiza deyatel'nosti obrazovatel'nykh organizatsiy/ V.N.Mikryukov, V.P.Ponevazh, A.N.Seregin, S.O.Sorokin// Vysshee obrazovanie segodnya.- 2015.- No.1.-pp.34.39.
9. L'vovich I.Ya. Informatsionnye tekhnologii modelirovaniya i optimizatsii: kratkaya teoriya i prilozheniya/ I.Ya.L'vovich, Ya.E.L'vovich, V.N.Frolov.- IPTs «Nauchnaya kniga».-2016. – 444 p.
10. Sobol' I.M. Chislennyye metody Monte-Karlo.- M.: Nauka.- 1973.- 312 p.
11. Kemeni Dzh., Snell Dzh. Konechnyye tsepi Markova: Per. s angl./ Pod red. A.A.Yushkevicha.-M.: Nauka.-1970.-272 p.
12. L'vovich Ya.E. Prinyatie resheniy v ekspertno-virtual'noy srede/Ya.E.L'vovich, I.Ya.L'vovich.-Voronezh: IPTs «Nauchnaya kniga». – 2010. – 140 p.