

22. Chkan A.V., Mikhaylov D.V. Primenenie masshtabiruemoy razryadnosti dannykh pri programmnoy realizatsii bystrogo preobrazovaniya Fur'e na rekonfiguriruemyykh vychislitel'nykh sistemakh [Application of scalable data bitness in software implementation of fast Fourier transformation on reconfigurable computing systems], *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologiy* [Herald of Computer and Information Technologies], 2018, No. 1 (163), pp. 44-50.
23. Ershova O.V., Kirichenko E.V., Semernikov E.A., Chkan, A.V. Masshtabirovanie dannykh s fiksirovannoy tochkoy v protsedure bystroy svertki [Scaling of fixed point data in the fast convolution procedure], *Radiotekhnika* [Radio engineering], 2015, No. 4, pp. 66-72.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. Э.В. Мельник.

Чкан Андрей Викторович – ООО "НИЦ супер-ЭВМ и нейрокомпьютеров"; e-mail: chkan_andrey@mail.ru; 347900, г. Таганрог, пер. Итальянский, 106; тел.: 88634368177; к.т.н.; научный сотрудник отдела ЦОС.

Chkan Andrey Victorovich – “Scientific research center of supercomputers and neurocomputers” CoLtd; e-mail: chkan_andrey@mail.ru; 106, Italyansky lane, Taganrog, 347900, Russia; phone: +78634368177; cand. of eng. sc.; research associate of department of Digital Signal Processing.

УДК 004.421

DOI 10.18522/2311-3103-2020-7-163-171

Н.И. Витиска, Н.А. Гуляев, В.В. Селянкин

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МНОГОКАНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛОГИЧЕСКОГО СИНТЕЗА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ОБЪЕМНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ

Рассматривается задача оптимизации проектирования многоканальных систем, используемых для прямой объемной визуализации с целью повышения качества её результата. Объемная визуализация широко используется в современных системах компьютерной визуализации, моделирования, симуляции, технического зрения, при этом отличается необходимостью обработки больших объемов данных для возможности получения высокого качества результата. Задача оптимизации проектирования многоканальных систем для объемной визуализации рассматривается с точки зрения достижения необходимого качества синтезируемого изображения при минимальных затратах. В работе предлагается метод логического синтеза таких систем, позволяющего получить оптимальные соотношения качества-затрат в зависимости от требуемых параметров постановки задачи. Предлагаемый метод позволяет достигать качества, близкого к результатам полного перебора, но требующего значительно меньший объем вычислений. Для каждого канала системы определяется набор переменных, оптимизация которых обеспечит качество результата визуализации. На основе параметров оптимизации строится переключательная функция с помощью диаграммы Вейча. Данный подход осуществляется программным путём в каждом канале распределённой системы в реальном масштабе времени, что задаёт общую схему такой методики. В процессе выполнения работы проводились экспериментальные исследования зависимости точности решения и объема вычислений для прямой объемной визуализации в каждом канале распределённой системы. Разработана методика оптимального синтеза изображений при условии выравнивания качества воспроизведения в небольшой группе каналов распределённой системы.

Оптимизация; многоканальные системы; логический синтез; объемная визуализация качества визуализации; трассировка лучей.

N.I. Vitiska, N.A. Gulyaev, V.V. Selyankin

MULTICHANNEL SYSTEM DESIGN OPTIMIZATION USING LOGICAL SYNTHESIS FOR QUALITY IMPROVEMENT OF VOLUME VISUALIZATION

The paper reviews a problem of optimization and quality improvement of development and design of multi-channel systems which perform direct volume visualization. Volume visualization is widely used in modern computer graphics and visualization systems. Volume visualization is well-known for its requirements – it demands large amounts of data to be processed to produce a high quality result. The optimization problem is considered as a quality-cost dependence, where the target is to achieve the required quality level at minimal cost. The paper proposes a method for logical synthesis of such systems, which allows to obtain optimal quality-cost ratios depending on the required parameters. The proposed method allows to achieve a quality level, that is close to results of a full-search solutions, but it requires a significantly smaller amount of calculations. For each channel of the system, a set of variables is defined, the optimization of which will ensure the quality of the resulting images. Based on the optimization parameters, a switching function is constructed using a Veitch diagram. This approach is implemented programmatically in each channel of the distributed system in real time, what sets the general scheme of the method. In described study, experimental research of relationship between the accuracy of the solution and the amount of calculations of direct volume visualization in each channel of a distributed system was performed. A method for optimal image synthesis based equalizing the playback quality in a small group of channels in a distributed system was developed.

Optimization; multi-channel systems; logical synthesis; volume visualization; visualization quality; ray tracing.

Введение. Системы реального времени передачи и обработки данных широко используются в решении задач визуализации, моделирования, симуляции, технического зрения. Примерами таких задач могут быть задачи синтеза и анализа изображений, выделение и восстановление объектов и объёмных феноменов в медицине и дефектоскопии, визуализация в системах виртуальной реальности, обучающих системах и виртуальных тренажёрах. Отличительными особенностями таких систем являются наличие большого объема данных и требования максимально возможного качества и скорости их обработки.

Высокая стоимость таких систем передачи и обработки данных требует разработки программно-аппаратных решений, позволяющих передавать по одной линии связи одновременно большого числа сообщений. С этой целью используют многоканальные системы, которые в своем развитии идут от аналоговых технологий к аналогово-цифровой реализации с постепенным увеличением цифровых решений. Получение заданных характеристик каналов, обеспечивающих высокое качество передачи информации, при проектировании цифровых и аналоговых систем передачи требует принятия таких программно-аппаратных решений, которые дают допустимые результаты по затратам и качеству.

Поскольку решение большинства современных задач в технических системах тесно связано с процедурой визуализации, которая может выступать как часть какой-то разработки, либо являться самостоятельной задачей, решаемой системой, то от эффективности визуализации, обеспечивающей необходимую точность и объем временных затрат, либо вычислительных ресурсов, зависит функционирование всей системы в целом. Стоит отметить, что современные программные системы нередко характеризуются несоответствием используемых инструментов визуализации требованиям задач. Например, актуальные в настоящее время задачи в областях интерактивной графики, виртуальной и дополненной реальности, системах моделирования, проектирования и дизайна требуют всё большего качества и реалистичности синтезируемых изображений.

Ряд задач визуализации в различных областях техники в настоящее время решается методами прямой объёмной визуализации. Ее применение может обеспечивать высокие показатели качества и степени реалистичности по сравнению с другими технологиями визуализации. Однако ее использование связано с необходимостью значительных стоимостных затрат и вычислительных ресурсов. В связи с этим прямая объёмная визуализация требует разработки методов оптимизации [1–3]. Использование гибридных методов прямой объёмной визуализации и компромиссных оптимизационных решений является перспективным оптимизационным решением благодаря большой гибкости. При этом исследования в этом направлении имеют своей целью поиск вариантов оптимального соотношения точности и времени визуализации. Практическое применение прямой объёмной визуализации в настоящее время ограничено по сравнению с другими парадигмами визуализации, однако, в области применения данной парадигмы наиболее широкое распространение получили методы рендеринга, основанные на трассировке лучей. Этот метод является одним из наиболее высокоточных методов рендеринга, однако он также является и одним из наиболее вычислительно сложных методов рендеринга. Поэтому исследования, ориентированные на повышение скорости метода трассировки лучей в рамках прямой объёмной визуализации, в настоящее время являются актуальными.

Важным вопросом в контексте повышения производительности объёмной визуализации является аппаратная и системная составляющая, т.е. возможность повышения производительности возможно и за счёт подбора наиболее подходящих для данной задачи аппаратных комплексов и операционных систем [4]. Действительно, реализация прямой объёмной визуализации аппаратными средствами общего назначения (CPU) может быть недостаточно производительной, специализированные вычислительные модули (например, GPU) могут не являться достаточно гибкими для решения всех задач в рамках объёмной визуализации [5]. С другой стороны, применение многоканальных распределённых систем может быть более подходящим вариантом, так как существует возможность варьировать архитектуру таких систем, в том числе – для приведения в соответствие с потребностями объёмной визуализации [6]. Обычно используются методы оптимизации, ориентированные на решение достаточно ситуативных задач – задач сокращения количества вычислений за счёт исключения из обработки фрагментов объёмного изображения, оказывающих малое влияние на результат [7]. Представляют интерес и значительно более стратегически ориентированные подходы, которые ставят целью решение более фундаментальных задач – задач проектирования систем, имеющих возможность решения конкретной задачи в конкретных условиях с учётом практических нюансов – стоимости оборудования, повышения отказоустойчивости и так далее [8–10]. Одной из таких задач является задача оптимизации проектирования многоканальных систем, используемых для прямой объёмной визуализации.

Постановка задачи. Обычно для каждого канала определяется набор переменных, оптимизация которых обеспечит качество получаемых изображений при определённой динамике их формирования. В рассматриваемой постановке задачи оптимизации число исследуемых параметров k , удовлетворяющих качеству получаемого изображения, предполагается не более двух, т.е. $n = 2^k$, где $k = [1; 2]$, а число оптимизируемых параметров n не более 4-х. Поэтому на каждом уровне оптимизации строится двухпараметрическая целевая функция. В качестве выбора одного или четырёх параметров оптимизации может быть построена переключательная функция с помощью диаграммы Вейча. Например, из переменных $x_1 \dots x_4$ строится конституэнта единицы, по которой программа оптимизирует параметры x без инверсий. В свою очередь параметры с инверсиями должны оптимизироваться на втором уровне.

Данный подход осуществляется программным путём в каждом канале рас-пределённой системы в реальном масштабе времени, что задаёт общую схему методики. При проектировании многоканальных распределённых систем следует решать проблемы с качеством синтезируемых изображений одновременно во всех каналах. Поэтому для выбора наилучшего решения рассмотрим следующий пример, который относился бы к системе, например с 16-ю каналами. Будем предполагать, что система характеризуется по каждому каналу четырьмя параметрами X_1, X_2, X_3, X_4 и соответствующей стоимостью обеспечения качества CT , которое будет достигнуто в данном канале для целевой функции оптимизации в виде переключательной функции из диаграммы Вейча (см. табл. 1). В ней каждая клетка соответствует конституэнте единицы, совпадающей с номером канала, т.е., например, $F = X_1X_2X_3X_4$ для 15-го канала. Поэтому для каждого канала сформулируем две постановки задачи (ПЗ) оптимизации:

Первая постановка:

$$F_1 = CT \rightarrow \min;$$

$$BK_i \geq BK_3$$

Вторая постановка:

$$F_2 = BK_{\text{общ}} \rightarrow \max;$$

$$CT \leq CT_3$$

Таким образом, при первой постановке задачи производится отбор таких вариантов реализации качества в каналах, чтобы система являлась самой дешёвой при условии, что качество в каждом канале будет по каждой переменной не ниже заданного. В свою очередь, во второй постановке необходимо достигать максимума по каждой переменной X при условии, что стоимость будет не выше заданной.

Известны два метода решения подобного рода задач [11–20]:

- перебор всевозможных вариантов;
- решение задачи оптимизации.

Таблица 1

Диаграмма Вейча для переключательной функции

		X_2					
X_1		12	13	9	8		X_3
		14	15	11	10		
		6	7	3	2		
		4	5	1	0		
		X_4					

Если предположить, что общее качество работы канала есть произведение качеств BK_i :

$$BK_{\text{общ.}} = BK_1BK_2BK_3;$$

(1.1)

$$CT_{\text{общ.}} = CT_1 + CT_2 + CT_3,$$

где bk_1, bk_2, bk_3 – вероятность подключения достаточного количества программно-аппаратных средств с целью получения заданного качества переменных x_1, x_2, x_3, x_4 , ct_1, ct_2, ct_3 – стоимость программно-аппаратных средств.

Таблица 2

Варианты показателей качества ПАС

Варианты	Показатели качества программно-аппаратных средств		
	M1	M2	M3
1	$вк_1^1 = 0,95$ $см_1^1 = 15000$	$вк_1^2 = 0,99$ $см_1^2 = 30000$	$вк_1^3 = 0,95$ $см_1^3 = 15000$
2	$вк_2^1 = 0,99$ $см_2^1 = 30000$	————	$вк_2^3 = 0,99$ $см_2^3 = 25000$
3	$вк_3^1 = 0,9$ $см_3^1 = 20000$	————	————

Будем считать, что в многоканальной системе возможно подключение трёх программно-аппаратных средств (ПАС), каждый из которых реализуется несколькими способами, как показано в табл. 2. В ней нижний индекс параметра соответствует варианту реализации, а верхний – виду программно-аппаратных средств. Требуется выбрать наилучший вариант реализации системы с учётом показателей качества по каждому каналу и соответствующих параметров x_1, x_2, x_4 .

Решение методом полного перебора. Рассмотрим возможность решения сформулированной выше задачи методом полного перебора вариантов многоканальной системы. Для этого в табл. 3 сведём возможные варианты системы и её характеристики по $вк$ и стоимости $см$, рассчитанные согласно формулам (1.1). Общее число вариантов реализации многоканальной системы составляет: $NB = 3 \times 1 \times 2 = 6$, где 3, 1, 2 – число способов возможной реализации соответствующих (с первого по третий) программно-аппаратных средств многоканальной системы (см. табл. 2). В таблицах 4,5 сведены лучшие варианты реализации многоканальной системы по критериям качества объёмных изображений и стоимости программно-аппаратных средств, обеспечивающих это качество.

Таблица 3

Возможные варианты системы и её характеристики

Вариант системы	Способ реализации ПАС в системе			Показатели качества изображений в каналах		Оптимальный вариант
	1	2	3	$см$	$вк$	
1	1	1	1	60000	0,893	2-я ПЗ
2	2	1	1	75000	0,931	————
3	3	1	1	65000	0,846	————
4	1	1	2	70000	0,931	1-я ПЗ
5	2	1	2	85000	0,970	————
6	3	1	2	75000	0,882	————

Лучшие варианты системы по качеству результата приведены в табл. 4.

Таблица 4

Лучшие варианты системы по качеству

Варианты системы	Показатели	
	$СТ$	$ВК$
2	75000	0,931
4	70000	0,931
5	85000	0,970

Лучшие варианты системы по критерию стоимости приведены в табл. 5.

Таблица 5

Лучшие варианты системы по стоимости

Варианты системы	Показатели	
	<i>СТ</i>	<i>БК</i>
1	60000	0,893
3	65000	0,846

Известно [11], что в общем случае, при выборе оптимальной структуры системы, состоящей из L компонентов (в нашем случае ПАС), где каждый l -й ПАС может быть реализован в m_l -х вариантах, общее число вариантов реализации NB составляет $NB = m_1 \cdot m_2 \cdot \dots \cdot m_L$. Тогда, если все ПАС реализуются одинаковым числом способов, т.е. $m_1 = m_2 = \dots = m_L$, то $NB = m^L$.

Число возможных вариантов реализации многоканальной системы при определённых значениях L ($L = 5, 10$) и m ($m = 2, 6$) (см. табл. 2) показывает, что для реальной системы из 10 ПАС, где каждый ПАС может быть реализован одним из 6 возможных вариантов, имеется 60 млн. вариантов. Если принять, что расчёт одного варианта реализации требует 0,1 мин., то общее время, необходимое для расчёта всех вариантов, составит около 5 лет.

Решение задачи оптимизации. Выбор оптимальной структуры системы выполняется путём решения задачи оптимизации. Здесь считается оптимальной структура системы, использующая дешёвые ПАС, на базе которых решается задача оптимизации. Для решения задачи оптимизации составим математическую модель с использованием булевых переменных $y_m^l \in \{0, 1\}$, где l – номер варианта; m – номер варианта реализации ПАС, определяемой в результате решения задачи оптимизации.

Причём принимаем то, что $y_m^l = 1$, если для l -го ПАС принят l -й вариант его решения, $y_m^l = 0$ – в противном случае. Когда используется одновариантная реализация ПАС системы, то приходим к следующей математической модели:

$$y_1^1 \vee y_2^1 \vee y_3^1 = 1; y_1^2 = 1; y_1^3 \vee y_2^3 = 1, \quad (1.2)$$

где \vee – знак операции дизъюнкции, а верхний индекс указывает на номер ПАС системы.

Стоимость каждого ПАС в зависимости от принятого варианта реализации составляет (значения cm_m^l взяты из табл. 2):

$$\begin{aligned} ст_1 &= 15000y_1^1 + 30000y_2^1 + 20000y_3^1; \\ ст_2 &= 30000y_1^2; \\ ст_3 &= 15000y_1^3 + 25000y_2^3; \end{aligned} \quad (1.3)$$

Аналогично для вероятности подключения достаточного количества ПАС запишем такую математическую модель:

$$\begin{aligned} вк_1 &= 0,95y_1^1 + 0,99y_2^1 + 0,90y_3^1; \\ вк_2 &= 0,99y_1^2; \\ вк_3 &= 0,90y_1^3 + 0,99y_2^3; \end{aligned} \quad (1.4)$$

Так как параметры систем зависят от параметров ПАС согласно (1.1), то эти ограничения условно обозначим через (1.5), а все в совокупности ограничения можно объединить подобным номером (1.6), записав его как

$$(1.6) = (1.2) + (1.3) + (1.4) + (1.5).$$

Задачу оптимизации можно сформулировать следующим образом:

Первая постановка:

$$F_1 = CT \rightarrow \min;$$

Ограничения (1.6);

$$BK \geq 0,93$$

Вторая постановка:

$$F_2 = BK \rightarrow \max;$$

Ограничения (1.6);

$$CT \geq 65000$$

Полученные системы представляют собой задачу нелинейного программирования, так как зависимости для вероятностей являются нелинейными. Поэтому её можно решать как нелинейную задачу, которая реализуется на ЭВМ значительно быстрее по сравнению с вариантом полного перебора.

Выводы. Объектом исследования является с одной стороны автоматизация прямой объемной визуализации в многоканальных распределенных системах реального времени, а с другой стороны оптимизация их проектирования с учётом стоимостных затрат на программно-аппаратные средства, обеспечивающих необходимый уровень качества результата. Следовательно, полученные результаты в работе позволяют заменить полный перебор при проектировании многоканальных систем на решение задачи нелинейного программирования, добиваясь тем самым минимизации временных затрат и ресурсов ЭВМ.

В процессе выполнения работы проводились экспериментальные исследования зависимости точности решения и объема вычислений для прямой объемной визуализации в каждом канале распределённой системы. Разработана методика оптимального синтеза изображений при условии выравнивания качества воспроизведения в небольшой группе каналов распределённой системы.

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 18-07-00733(а).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Витиска Н.И., Гуляев Н.А., Данилов И.Г.* О проблемах и задачах обработки и организации данных при объёмной визуализации на распределённых системах // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2019. – № 4. – С. 153-163.
2. *Витиска Н.И. и др.* Оптимизация прямой объёмной визуализации с программируемым управлением качества: монография. – М.: Изд-во «Перо», 2020. – 82 с.
3. *Vitiska N., Selyankin V., Gulyaev N.* An Approach to Optimization of Ray-Tracing In Volume Visualization Based on Properties of Volume Elements // Proceedings of the Third International Scientific Conference «Intelligent Information Technologies for Industry» (ITI'18). – Springer International Publishing, 2019. – Vol. 1. – P. 148-158.
4. *Strassburger S., Schulze T., Fujimoto R.* Future trends in distributed simulation and distributed virtual environments: results of a peer study // Proc. 40th Conference on Winter Simulation. – 2008. – P. 777-785.
5. *Морозов Б.Б. и др.* Особенности построения систем визуализации на базе распределенной мультимедийной среды // Вестник НГУ. Серия: Физика. – 2013. – № 4 (8). – С. 118-124.
6. *Морозов Б.Б. и др.* Построение распределённой мультимедийной виртуальной среды с многоканальной визуализацией медиаданных на графических акселераторах // Матер. 25-й Международной конференции по компьютерной графике и зрению ГрафиКон – 2015. – 2013. – С. 166-170.
7. *Витиска Н.И., Гуляев Н.А.* Исследование и разработка метода сокращения вычислений при трассировке лучей в объёмной визуализации // Информатизация и связь. – 2018. – № 6. – С. 44-52.
8. *Слядников Е.Е.* Моделирование распределенных информационно-телекоммуникационных систем с пакетной передачей данных // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – № 5. – С. 55-60.
9. *Калиниченко С.В., Хомоненко А.Д.* Модель оценки оперативности функционирования распределённых автоматизированных систем при интеграции данных // Бюллетень результатов научных исследований: электронный научный журнал. – 2012. – № 5 (4). – С. 47-57.

10. Барский А.Б., Мельник Д.И., Пирожник В.В. Модель управления качеством вычислительных средств распределённой многоканальной системы массового обслуживания // Информационные технологии. – 2019. – № 6 (25). – С. 358-367.
11. Шелобаев С.И. Математические методы и модели в экономике, финансах, бизнесе: учеб. пособие для вузов. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2001. – 367 с.
12. Арсеньев Ю.И., Шелобаев С.И. Модели и методы оптимизации ресурсов субъектов рынка. – М.: Высшая школа, 1998.
13. Арсеньев Ю.И., Шелобаев С.И. Анализ, синтез и оптимизация социо-техно-экономических систем: надёжность, безопасность, эффективность, качество. – М.: Высшая школа, 1998.
14. Meyhak H. Simultane Gesamtplanung im mehrstufigen Mehrproduktunternehmen. – Mannheim, 1968.
15. Zuehl W. von. Programmierung Ganzzahlige // Handwörterbuch der Wissenschaften. – Stuttgart u.a, 1988.
16. Таха Х. Введение в исследование операций. – М.: Мир, 1985. – Т. 1, Т. 2.
17. Эддоус М., Стэнфорд Р. Методы принятия решений. – М.: Аудит, ЮНИТИ, 1997.
18. Бешелев С.Д., Гурвич Ф.Г. Математико-статистические методы экспертных оценок. – М.: Статистика, 1980.
19. Бункин В.А., Курицкий Б.Я., Сокурено Ю.А. Справочник по оптимизационным задачам в АСУ. – Л.: Машиностроение, 1984.
20. Арсеньев Ю.И., Минаев В.С. Управление рисками. – М.: Высшая школа, 1997.

REFERENCES

1. Vitiska N.I., Gulyaev N.A., Danilov I.G. O problemakh i zadachakh obrabotki i organizatsii dannykh pri ob"emnoy vizualizatsii na raspredelennykh sistemakh [On problems and tasks of data processing and organization in volumetric visualization on distributed systems], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2019, No. 4, pp. 153-163.
2. Vitiska N.I. i dr. Optimizatsiya pryamoy ob"emnoy vizualizatsii s programmiruemyem upravleniem kachestva: monografiya [Optimization of direct volumetric visualization with programmable quality control: monograph]. Moscow: Izd-vo «Pero», 2020, 82 p.
3. Vitiska N., Selyankin V., Gulyaev N. An Approach to Optimization of Ray-Tracing in Volume Visualization Based on Properties of Volume Elements, *Proceedings of the Third International Scientific Conference «Intelligent Information Technologies for Industry» (IITI'18)*. Springer International Publishing, 2019, Vol. 1, pp. 148-158.
4. Strassburger S., Schulze T., Fujimoto R. Future trends in distributed simulation and distributed virtual environments: results of a peer study, *Proc. 40th Conference on Winter Simulation*, 2008, pp. 777-785.
5. Morozov B.B. i dr. Osobennosti postroeniya sistem vizualizatsii na baze raspredelennoy mul'timediynoy sredy [Features of building visualization systems based on a distributed multimedia environment], *Vestnik NGU. Seriya: Fizika* [Bulletin of the NSU. Series: Physics], 2013, No. 4 (8), pp. 118-124.
6. Morozov B.B. i dr. Postroenie raspredelennoy mul'timediynoy virtual'noy sredy s mnogokanal'noy vizualizatsiyei mediadannykh na graficheskikh akseleratorakh [Building a distributed multimedia virtual environment with multichannel visualization of media data on graphics accelerators], *Mater. 25-y Mezhdunarodnoy konferentsii po komp'yuternoy grafike i zreniyu GrafiKon – 2015* [Proceedings of the 25th International Conference on Computer Graphics and Vision GraphiCon-2015], 2013, pp. 166-170.
7. Vitiska N.I., Gulyaev N.A. Issledovanie i razrabotka metoda sokrashcheniya vychisleniy pri trassirovke luchey v ob"emnoy vizualizatsii [Research and development of a method for reducing calculations in ray tracing in volumetric visualization], *Informatizatsiya i svyaz'* [Informatization and communication], 2018, No. 6, pp. 44-52.
8. Slyadnikov E.E. Modelirovanie raspredelennykh informatsionno-telekommunikatsionnykh sistem s paketnoy peredachei dannykh [Modeling of distributed information and telecommunication systems with packet data transmission], *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of the Tomsk Polytechnic University], 2008, No. 5, pp. 55-60.

9. *Kalinichenko S.V., Khomonenko A.D.* Model' otsenki operativnosti funktsionirovaniya raspredelennykh avtomatizirovannykh sistem pri integratsii dannykh [The model of estimation of efficiency of functioning of the distributed automated systems when integrating data], *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy: elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Bulletin of the results of scientific research: electronic scientific journal], 2012, No. 5 (4), pp. 47-57.
10. *Barskiy A.B., Mel'nik D.I., Pirozhnik V.V.* Model' upravleniya kachestvom vychislitel'nykh sredstv raspredelennoy mnogokanal'noy sistemy massovogo obsluzhivaniya [The model of quality management of computational means of a distributed multichannel queuing system], *Informatsionnye tekhnologii* [Information technologies], 2019, No. 6 (25), pp. 358-367.
11. *Shelobaev S.I.* Matematicheskie metody i modeli v ekonomike, finansakh, biznese: ucheb. posobie dlya vuzov [Mathematical methods and models in economics, finance, and business: a textbook for universities]. Moscow: YuNITI-DANA, 2001, 367 p.
12. *Arsen'ev Yu.I., Shelobaev S.I.* Modeli i metody optimizatsii resursov sub'ektov rynka [Models and methods of optimizing the resources of market subjects]. Moscow: Vysshaya shkola, 1998.
13. *Arsen'ev Yu.I., Shelobaev S.I.* Analiz, sintez i optimizatsiya sotsio-tekhno-ekonomicheskikh sistem: nadezhnost', bezopasnost', effektivnost', kachestvo [Analysis, synthesis and optimization of socio-techno-economic systems: reliability, safety, efficiency, quality]. Moscow: Vysshaya shkola, 1998.
14. *Meyhak H.* Simultane Gesamtplanung im mehrstufigen Mehrproduktunternehmen. Mannheim, 1968.
15. *Zwehl W. von.* Programmierung Ganzzahlige, *Handwörterbuch der Wissenschaften.* Stuttgart u.a., 1988.
16. *Takha Kh.* Vvedenie v issledovanie operatsiy [Introduction to the study of operations]. Moscow: Mir, 1985, Vol. 1, Vol. 2.
17. *Eddous M., Stensfild R.* Metody prinyatiya resheniy [Methods of decision-making]. Moscow: Audit, YuNITI, 1997.
18. *Beshelev S.D., Gurvich F.G.* Matematiko-statisticheskie metody ekspertnykh otsenok [Mathematical and statistical methods of expert assessments]. Moscow: Statistika, 1980.
19. *Bunkin V.A., Kuritskiy B.Ya., Sokurenko Yu.A.* Spravochnik po optimizatsionnym zadacham v ASU [Handbook of optimization problems in automated control systems]. Leningrad: Mashinostroenie, 1984.
20. *Arsen'ev Yu.I., Minaev V.S.* Upravlenie riskami [Risk management]. Moscow: Vysshaya shkola, 1997.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Л.К. Бабенко.

Витиска Николай Иванович – Общество с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский институт многопроцессорных вычислительных и управляющих систем»; e-mail: vit614294@rambler.ru; 347905, г. Таганрог, ул. Социалистическая, 150-г.; тел.: 88634614294; д.т.н.; в.н.с.

Гуляев Никита Андреевич – Южный федеральный университет; e-mail: m.yo.da@yandex.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371673; кафедра МОПЭВМ; ассистент.

Селянкин Владимир Васильевич – e-mail: selyankin@sfnu.ru; кафедра МОП ЭВМ; к.т.н.; доцент.

Vitiska Nikolaj Ivanovich – Scientific Research Institute of Multiprocessor Computer and Control Systems, Co Ltd.; e-mail: vit614294@rambler.ru; 150-g, Socialist street, Taganrog, 347905, Russia; phone: +78634614294; dr. of eng. sc.; leading researcher.

Gulyaev Nikita Andreevich – Southern Federal University; e-mail: m.yo.da@yandex.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +788634371673; the department of software engineering; cand. of eng. sc.; assistant professor.

Selyankin Wladimir Wasilevich – e-mail: selyankin@sfnu.ru; the department of software engineering; cand. of eng. sc.; associate professor.