



## Программная реализация задач моделирования основных интегральных показателей функционирования экономических информационных систем

О.А. Терновский<sup>1</sup>, А.Н. Кузьминов<sup>2</sup>, А.Н. Скоба<sup>3</sup>, В.К. Михайлов<sup>3</sup>, Н.С. Скорик<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Каменский институт (филиал) государственного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Российский государственный политехнический университет им. М.И. Платова (НПИ)»

<sup>2</sup>Ростовский государственный экономический университет (РИНХ), г. Ростов-на-Дону.

<sup>3</sup>Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М. И. Платова, Новочеркасск

**Аннотация:** в данной статье описан программный комплекс для решения задачи оптимального размещения информационных ресурсов по узлам распределённой экономической информационной системы по критерию минимума среднего времени реакции системы на запросы пользователей, а также для решения задач моделирования основных технико-экономических показателей эффективности работы таких систем. Комплекс состоит из программно реализованных математических моделей функционирования распределённых систем обработки экономической информации, а также алгоритма оптимизации. Разработанный программный продукт также позволяет производить эксперименты для получения и последующего анализа зависимостей реактивности распределённых систем от таких интегральных характеристик, как размерность задачи, интенсивности формирования запросов пользователями, скорости передачи сообщений по каналам связи, скорости считывания, скорости записи и обработки в узлах, производительности используемых ПЭВМ и т.д. Программная реализация была выполнена на языке *C#*, платформе *NetFramework 4.6.1*, с использованием среды разработки *Microsoft Visual Studio 2017 Community*.

**Ключевые слова:** экономическая информационная система, распределённая система обработки информации, уравнение глобального баланса, замкнутая экспоненциальная сеть массового обслуживания, пространство состояний случайного процесса, матрица переходных вероятностей, интенсивности обслуживания в узлах сети, стационарные вероятности, среднее время реакции системы на запросы пользователей.

Основными задачами, решаемыми экономическими информационными системами (ЭИС) на предприятиях, являются задачи автоматизации документооборота (бухгалтерский учёт, учёт планово-экономических показателей), автоматизация управленческой деятельности (учёт комплектующих изделий и материалов на заводских складах, учёт готовой продукции), формирование годовых производственных программ на основе

использования экономико-математических методов, управление реализацией и сбытом готовой продукции и т.д.

Как было отмечено в работе [1] архитектура современных ЭИС базируется на принципах клиент-серверного взаимодействия программных компонентов информационной системы, которая реализует многопользовательский режим работы и относится к распределённым системам обработки информации (СОИ).

При внедрении таких систем возникает целый ряд качественно новых исследовательских задач, от решения которых в значительной степени будет зависеть эффективность использования ресурсов ЭИС и качество информационного сервиса, предоставляемого пользователям.

Среди наиболее важных задач можно назвать следующие: выбор архитектуры разрабатываемой ЭИС и аппаратно-программных средств для её реализации (необходимого количества серверов и их производительности, оптимальной скорости передачи данных по каналам связи, скорости записи/считывания информации в узлах и т.д.) ; организация системы управления ресурсами и реализация взаимодействия различных элементов системы; оптимальное размещение информационного и программного обеспечения коллективного пользования по узлам распределённой СОИ.

Разработанные авторами аналитико-численные модели функционирования распределённых СОИ, а также алгоритм оптимизации [2 – 9] составили методологическую базу программного комплекса для решения задач оптимального размещения информационных ресурсов по узлам распределённой ЭИС по критерию минимума среднего времени реакции системы на запросы пользователей, а также для моделирования зависимости реактивности работы ЭИС от основных интегральных показателей её функционирования: размерности задачи, интенсивности формирования

---

запросов пользователями, скорости передачи сообщений по каналам связи, скорости считывания, скорости записи и обработки в узлах и т.д.

Разработанный программный комплекс включает следующие модули: модуль конструирования исходных данных; модуль моделирования; модуль оптимизации; модуль проведения экспериментов.

Модуль конструирования исходных данных позволяет сформировать исходные данные для различных архитектур распределённых СОИ. Так подробное конструирование исходных данных для распределённых СОИ, реализованных на базе архитектуры «файл-сервер» представлено в работах [2-3].

Отличительной особенностью конструирования исходных данных для функционирования распределённой СОИ на базе двухуровневой архитектуры «клиент-сервер» от архитектуры «файл-сервер» является то, что на сервере происходит селективная выборка информации и по каналу связи передаётся не полная база данных, а некоторое количество кортежей базы данных, удовлетворяющих условию *SQL*-запроса. В соответствии с этим, в исходные данные вводится матрица объёмов информации, получаемой после процессорной обработки [4-5].

Для моделей функционирования распределённых СОИ на базе трёхуровневой архитектуры «клиент-сервер» исходные данные, по сравнению с двухуровневой архитектурой «клиент-сервер», модифицируются следующим образом - добавляются следующие величины: множество серверов приложений и множество бизнес-приложений, размещаемых на них; матрица распределения бизнес-приложений по серверам приложений; матрица объёмов считываемой информации по *SQL* запросам, сформированных бизнес-приложениями к базам данных. Подробно процесс конструирования исходных данных для данной архитектуры распределённых СОИ описан в работах [6-7].

---

В основе модуля моделирования лежит решение уравнения глобального баланса для замкнутых экспоненциальных сетей массового обслуживания (СеМО), которое в стационарном режиме имеет вид:

$$\sum_{k=1}^N \sum_{r=1}^n P(\bar{i}) \mu_{kr} = \sum_{l=1}^N \sum_{k=1}^N \sum_{r=1}^n P(\bar{i} + \bar{1}_{lr} - \bar{1}_{kr}) \mu_{lr} P_{lk}(r), \quad (1)$$

где  $P(\bar{i})$  – стационарная вероятность того, что сеть находится в состоянии  $\bar{i}$ , где  $\bar{i} \in \bar{E}(n, N) = \{\bar{i}, i_k \geq 0, \sum_{k=1}^N i_k = n\}$  – векторное пространство состояний;  $N$  – общее количество центров обслуживания заявок;  $n$  – количество пользователей;  $\mu_{kr}, (r = \overline{1, n}, k = \overline{1, N})$  – интенсивность обслуживания в  $k$ -м узле сообщения  $r$ -го пользователя;  $\mu_{lr}, (r = \overline{1, n}, l = \overline{1, N})$  – интенсивность обслуживания в  $l$ -м узле сообщения  $r$ -го пользователя;  $\bar{1}_{kr}, \bar{1}_{lr}$  – вектора, в  $k$ -ой и  $l$ -ой координате которых  $(k = \overline{1, N}, l = \overline{1, N})$ , на  $r$ -ом месте  $(r = \overline{1, n})$  стоит 1, а все остальные значения равны нулю;  $P_{lk}(r)$  – вероятность того, что сообщение  $r$ -го пользователя после обслуживания в  $l$ -м узле попадёт в  $k$ -й узел.

Подробная методика расчёта элементов матриц переходных вероятностей приведена в работах [2, 3].

При расчёте величины  $\mu_{sr}, (s = \overline{1, N}, r = \overline{1, n})$  учитываются различные группы потока заявок в СеМО в зависимости от выбранной архитектуры распределённой СООИ [2 – 6]. Кроме того, для обеспечения целостности данных, при расчёте величин  $\mu_{sr}, (s = \overline{1, N}, r = \overline{1, n})$ , учитываются временные задержки, связанные с возможностью состояний блокировок на уровне всей базы данных [3, 5, 7].

В работах [2, 4, 6] было показано, что выражения для стационарных вероятностей состояний СеМО, описываемой уравнением (1) имеют мультипликативную форму и могут быть представлены в виде:

$$P(\bar{i}) = G^{-1}(n, N) \prod_{s=1}^N Z_s(\bar{i}_s),$$

где  $G(n, N)$  – нормализующая константа, значение которой определяется тем, что сумма вероятностей  $P(i)$  всех состояний СеМО равна единице, т.е.  $\sum_{i \in \bar{E}(n, N)} P(i) = 1$ ,  $\bar{i}_s$  – общее число сообщений в центре

$s, (i_s = \sum_{r=1}^n i_{sr}), Z_s(\bar{i}_s) = i_s! \prod_{r=1}^n \frac{1}{i_{sr}!} \left( \frac{e_{sr}}{\mu_{sr}} \right)^{i_{sr}}$ , где  $e_{sr}, (s = \overline{1, N}, r = \overline{1, n})$  – коэффициенты

передачи, которые находятся из решения системы линейных алгебраических уравнений вида:

$$e_{sr} = \sum_{j=1}^N e_{jr} P_{js}(r), (s = \overline{1, N}, r = \overline{1, n}).$$

Расчёт величины  $\bar{T}$  – среднего времени реакции системы на запросы пользователей, определяется соотношением вида:

$$\bar{T} = \frac{1}{\sum_{r=1}^n \lambda_r} \sum_{r=1}^n \lambda_r \bar{T}_r, \quad (2)$$

где  $\lambda_r, (r = \overline{1, n})$  – интенсивность формирования запросов  $r$ -м пользователем;  $\bar{T}_r, (r = \overline{1, n})$  – среднее время реакции системы на запрос  $r$ -го пользователя.

В работах [2, 4, 6] было показано, что расчёт величины  $\bar{T}$  по формуле (2) сводится, по существу, к расчёту нормализующей константы  $G(n, N)$ , для вычисления которой был использован метод, описанный в работе [8].

Модуль оптимизации решает задачу оптимального размещения информационных ресурсов по узлам распределённой СОИ по критерию минимума среднего времени реакции на запросы пользователей, которая может быть представлена в виде:

$$\left. \begin{aligned} \bar{T} = \bar{T}(X) \rightarrow \min \\ \text{при ограничении} \\ \sum_{k=1}^n x_{jk} = 1, j = \overline{1, d}. \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

где  $X = \|X_{jk}\|$ ,  $(j = \overline{1, d}, k = \overline{1, n})$  – матрица, задающая взаимосвязь между ПЭВМ и размещаемыми на них отношениями (базами данных), количество которых равно  $d$ ;  $\bar{T}(X)$  – имеет вид (2), для размещения, задаваемого матрицей  $X$ .

Как показал проведённый анализ, задача (3) является задачей нелинейной комбинаторной оптимизации с булевыми переменными, которая относится к классу  $NP$ -сложных задач, для которых, в настоящее время, отсутствуют эффективные процедуры решения [9]. Для решения задачи (3) был использован, разработанный авторами, полуэвристический алгоритм, основанный на методах стохастического программирования, подробное описание которого и результаты эффективности его работы приведены в работе [10].

Программная реализация описанных модулей, была выполнена на языке  $C\#$ , платформе *NetFramework 4.6.1*, с использованием среды разработки *Microsoft Visual Studio 2017 Community* и частично изложена в работе [11], без подробного описания разработанного интерфейса и модуля проведения экспериментов. Главное окно программы представлено на рис. 1.

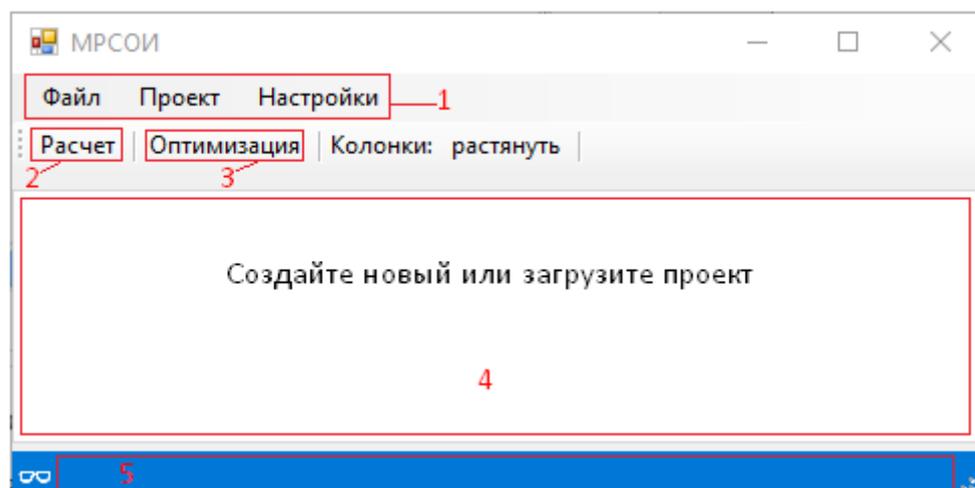


Рис. 1. – Главное окно программы

Так функциональная компонента 1 – предоставляет переход к следующим вспомогательным формам: создание нового проекта (рис. 2);

ввод исходных данных (рис. 3); ввод основных настроек проекта (рис. 4);  
проведение экспериментов (рис. 5).

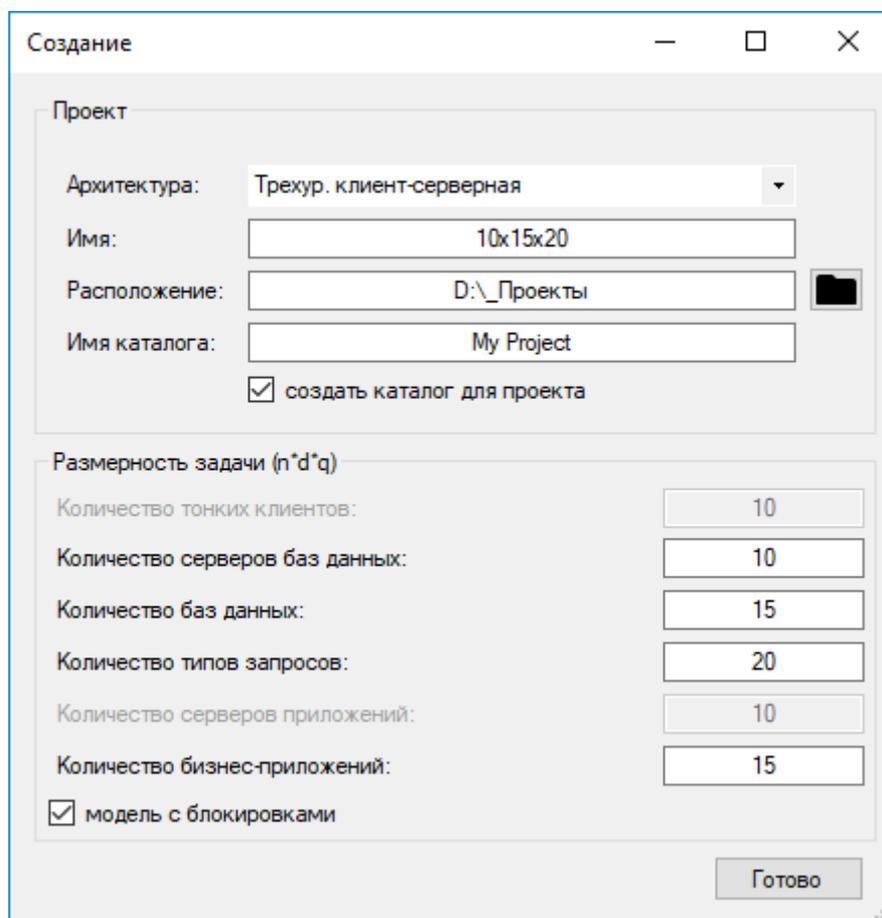


Рис. 2. – Окно создания нового проекта

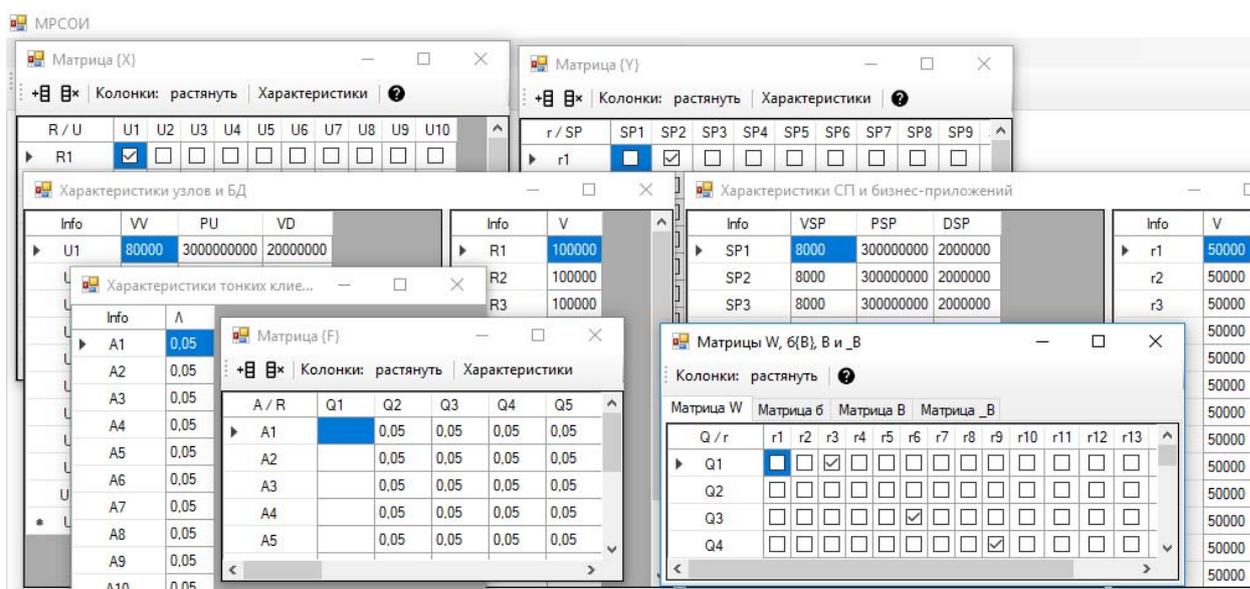


Рис. 3. – Окна ввода исходных данных модели

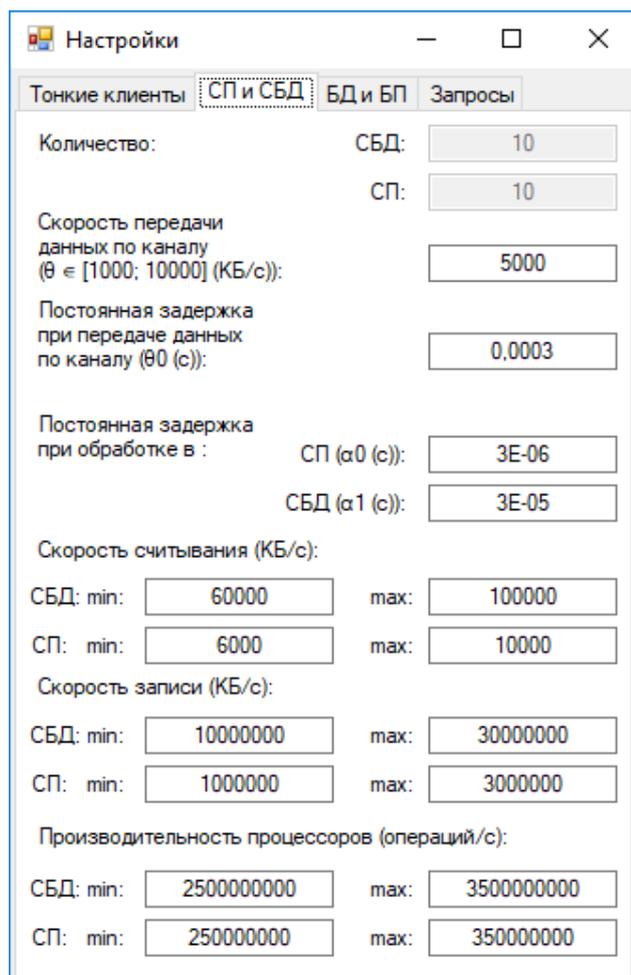


Рис. 4. – Основные настройки проекта

Функция «Расчёт» запускает полный цикл вычисления основных характеристик модели и выводит результат на экран. Функция «Оптимизация» запускает алгоритм оптимизации для загруженной модели и в итоге предоставляет пользователю результат решения задачи-вариант оптимального размещения информационных ресурсов по узлам распределённой СОИ, с правом сохранения или отказа.

В программе предусмотрен режим автоматического конструирования матрицы  $X = \|X_{R_j U_k}\| = \|x_{jk}\|, (j = \overline{1, d}, k = \overline{1, n})$  (начального распределения) в основе которого лежит использование генератора равновероятного выбора [11].

Для вычисления значений нормализующей константы  $G(n, N)$  в программе был использован метод, изложенный в работе [8], трудоёмкость

которого равна  $\approx O(N * 2^{2n})$ , где  $N$ -количество узлов СеМО,  $n$ -количество пользователей. Для уменьшения трудоёмкости вычисления нормализующей константы, авторами была разработана и программно реализована оригинальная процедура уменьшения количества арифметических операций и запоминаемых промежуточных элементов [11], основанная на константном поиске элемента массива, путем перевода идентифицирующей части величин  $G_m(\bar{n})$  и  $G_m(\bar{n} - \bar{1}_r)$  (речь идет о векторах  $\bar{n}$  и  $\bar{n} - \bar{1}_r$ ) в десятичную систему счисления, что позволило снизить трудоёмкость данной вычислительной процедуры до вполне приемлимой величины  $\approx O(N * 2^n)$ . После завершения процедуры расчёта величины  $\bar{T}$  (рис. 5), результат будет загружен на главную форму программы и отобразится в диалогом окне и статус-панели, а также будет выгружен на диск в соответствующем каталоге.

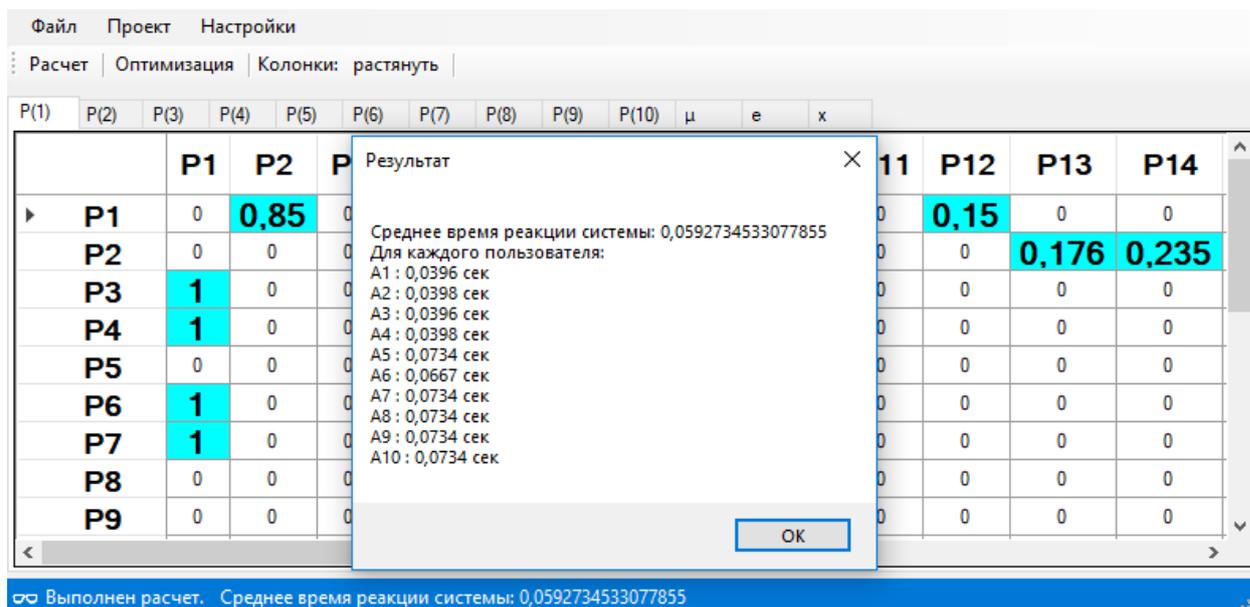


Рис. 5. – Результат работы алгоритма расчета среднего времени реакции системы

После этого включается процедура оптимизации величины  $\bar{T}$ , связанная с перераспределением информационных ресурсов  $X = \|X_{R_j U_k}\| = \|x_{jk}\|$ , ( $j = \overline{1, d}, k = \overline{1, n}$ ) (в соответствии с алгоритмом оптимизации) по узлам

распределённой СОИ. При этом окончательное значение величины  $\bar{T}$  отображается на статус-панели (рис. 6).

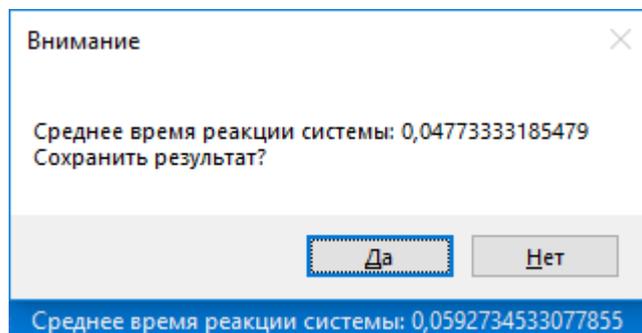


Рис. 6. – Точка останова алгоритма оптимизации

Разработанный программный комплекс также позволяет проводить эксперименты для получения и последующего анализа зависимости величины  $\bar{T}$  от таких характеристик, как размерность задачи, интенсивности формирования запросов, скорости передачи сообщений по каналу связи, скорости считывания, записи и обработки в узлах, а также определять степень влияния блокировок на величину  $\bar{T}$  и т.д. Для этого в программе предусмотрен режим проведения экспериментов, главное окно которого представлено на рис. 7.

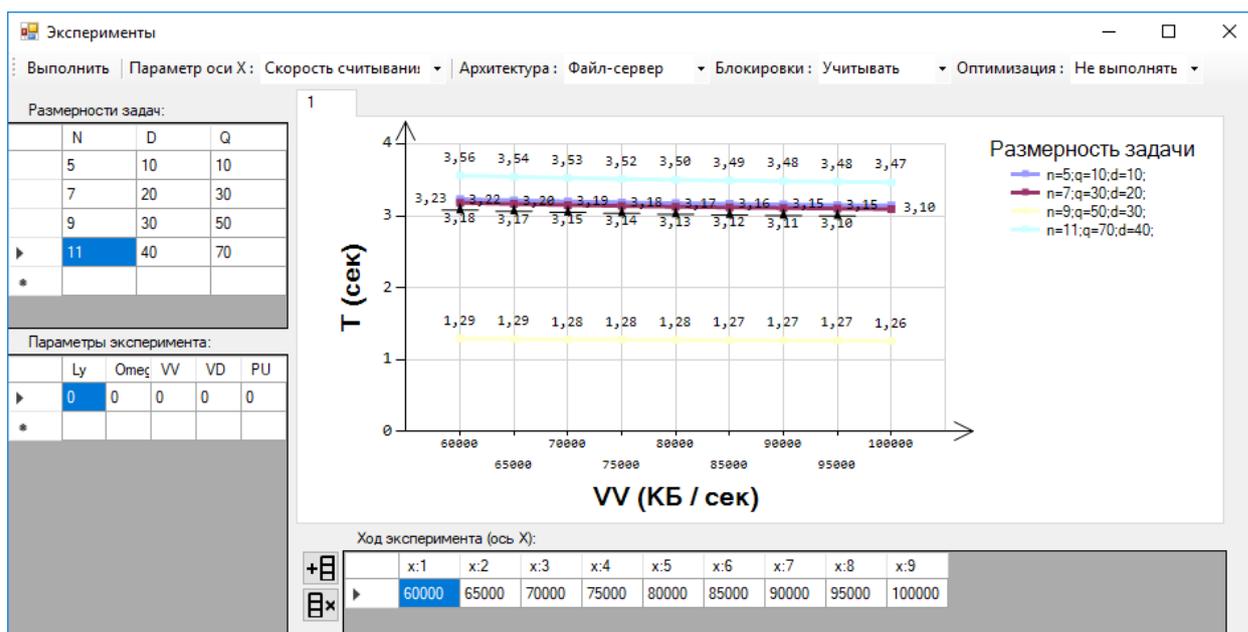


Рис. 7. – Главное окно модуля проведения экспериментов

Разработанный авторами программный комплекс [12,13] был протестирован на решении прикладных задач для ОАО «Каменскволокно» (г.Каменск-Шахтинский, Ростовская область) и в настоящее время дорабатывается с учётом пожеланий-рекомендаций специалистов IT-отдела данного предприятия.

*Статья подготовлена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-010-01095 «Междисциплинарный подход к исследованию крупномасштабных экономических систем на основе теории ценозов»*

### Литература

1. Кузьминов А.Н. Ценологический инструментарий управления региональной рыночной средой предприятий малого бизнеса. Ростов-на-Дону: СКНЦ ВШ, 2007. С. 124.

2. Скоба А.Н., Терновский О.А. Математическая модель оптимального распределения ресурсов при внедрении распределённой информационной системы на предприятии // Интеграция науки и практики как механизм развития отечественных наукоёмких технологий производства: сб. науч. ст. по материалам IV Всерос. науч.-практ. конф, Каменск-Шахтинский, 12 нояб. 2014г./ Каменский ин-т(фил.) ЮРГПУ(НПИ) им. М.И. Платова. Новочеркасск: Лик, 2015. С. 180-189.

3. Скоба А.Н., Терновский О.А. Аналитико-численная модель оптимального размещения распределённой базы данных по узлам ЛВС на базе архитектуры «файл-сервер» с учётом влияния блокировок // Интеграция науки и практики как механизм развития отечественных наукоёмких технологий производства: сб. науч. ст. по материалам V Всерос. науч.-практ. конф., Каменск-Шахтинский, 2 дек. 2015г./ Каменский ин-т(фил.) ЮРГПУ(НПИ) им. М.И. Платова. Новочеркасск: Лик, 2016. С. 61-70.

4. Скоба А.Н., Состина Е.В. Математическая модель оптимального размещения распределённой базы данных по узлам ЛВС на базе

---

двухуровневой клиент-серверной архитектуры // Инженерный вестник Дона, 2015, №2. URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2015/2882.

5. Скоба А.Н., Терновский О.А., Логанчук М.Л. Аналитико-численная модель оптимального размещения информационных ресурсов по узлам локальной вычислительной сети на базе двухуровневой архитектуры «клиент-сервер» с учётом влияния блокировок // Интеграция науки и практики как механизм развития отечественных наукоёмких технологий производства: сб. науч. ст. по материалам VI Всерос. науч.-практ. конф., Каменск-Шахтинский, 14 фев. 2017г./ Каменский ин-т(фил.) ЮРГПУ(НПИ) им. М.И. Платова. Новочеркасск: Лик, 2017. С. 158-167.

6. Скоба А.Н., Айеш Ахмед Нафеа Айеш. Математическая модель оптимального размещения информационных ресурсов по узлам распределённой информационной системы на базе трёхуровневой клиент-серверной архитектуры без учёта влияния блокировок //Инженерный вестник Дона, 2018, №1. URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4658.

7. Скоба А.Н., Михайлов В.К., Айеш Ахмед Нафеа Айеш. Модель оптимального размещения информационных ресурсов по узлам распределённой системы обработки информации предприятия на базе трёхуровневой архитектуры «клиент-сервер» с учётом влияния блокировок. // Изв. вузов. Электромеханика, 2018. Т. 61. №3. С. 68-75.

8. Buzen J.P. Computational Algorithms for Closed Queueing Networks with Exponential Servers. Commun. ACM. 1983. Vol.16, №9. – pp. 527-531.

9. Antunes C. H. et al. A Multiple Objective Routine Algorithm for Integrated Communication Network. Proc ITC-16. 1999. V. 3b. pp. 1291-1300.

10. Скоба А.Н., Айеш Ахмед Нафеа Айеш, Михайлов В.К. Эвристический алгоритм решения задачи размещения информационных ресурсов // Инженерный вестник Дона, 2018, №1 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4744.

---

11. Михайлов В.К., Скоба А.Н., Айеш Ахмед Нафеа Айеш. Программная реализация моделей оптимального распределения информационных ресурсов // Инженерный вестник Дона, 2018, №2 URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2018/4888.

12. Айеш Ахмед Нафеа Айеш, Михайлов В.К., Скоба А.Н. Моделирование и оптимизация информационных ресурсов на базе файл-серверной архитектуры. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2018618683, Роспатент, М., 17.07.2018.

13. Айеш Ахмед Нафеа Айеш, Михайлов В.К., Скоба А.Н. Моделирование и оптимизация информационных ресурсов на базе двухуровневой клиент-серверной архитектуры. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2018618844, Роспатент, М., 20.07.2018.

### References

1. Kuz'minov A.N. Cenologicheskij instrumentarij upravleniya regional'noj ry'nochnoj sredoj predpriyatij malogo biznesa [Cenological management instrumentation regional market environment of small businesses]. Rostov-on-Don: SKNCz VSh, 2007. 124 p.

2. Skoba A.N., Ternovskij O.A. Integraciya nauki i praktiki kak mexanizm razvitiya otechestvenny`x naukoymkix texnologij proizvodstva: sb. nauch. st. po materialam IV Vseros. nauch.-prakt. konf. Novochockassk: Lik, 2015. pp. 180-189.

3. Skoba A.N., Ternovskij O.A. Integraciya nauki i praktiki kak mexanizm razvitiya otechestvenny`x naukoymkix texnologij proizvodstva: sb. nauch. st. po materialam V Vseros. nauch.-prakt. konf. Novochockassk: Lik, 2016. pp. 61-70.

4. Skoba A.N., Sostina E.V. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2015. №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2015/2882.



5. Skoba A.N., Ternovskij O.A., Loganchuk M.L. Integraciya nauki i praktiki kak mexanizm razvitiya otechestvenny`x naukoymkix texnologij proizvodstva: sb. nauch. st. po materialam VI Vseros. nauch.-prakt. konf. Novoчерkassk: Lik, 2017. pp. 158-167.
6. Skoba A.N., Ayesh Achmed Nafea Ayesh Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2018. №1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4658](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4658).
7. Skoba A.N., Mikhaylov V.K., Ayesh Achmed Nafea Ayesh. Izv. vuzov. E`lektromexanika, 2018. V. 61. №3. pp. 68-75.
8. Buzen J.P. Computational Algorithms for Closed Queueing Networks with Exponential Servers. Commun. ACM. 1983. Vol.16, №9. pp. 527-531.
9. Antunes C. H. et al. A Multiple Objective Routine Algorithm for Integrated Communication Network. Proc ITC-16. 1999. V. 3b. pp. 1291-1300.
10. Skoba A.N., Ayesh Achmed Nafea Ayesh, Mikhaylov V.K. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2018. №1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4744](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4744).
11. Mikhaylov V.K., Skoba A.N., Ayesh Achmed Nafea Ayesh Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2018. №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2018/4888](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2018/4888)
12. Ayesh Achmed Nafea Ayesh, Mikhaylov V.K., Skoba A.N. Svidetel`stvo ob oficial`noj registracii programmy` dlya E`VM №2018618683 [Certificate of official registration of computer programs №2018618683]. Rospatent, M, 17.07.2018.
13. Ayesh Achmed Nafea Ayesh, Mikhaylov V.K., Skoba A.N. Svidetel`stvo ob oficial`noj registracii programmy` dlya E`VM №2018618844 [Certificate of official registration of computer programs №2018618844]. Rospatent, M., 20.07.2018.