

УДК: 681.5: 519.86

## Системное моделирование, оценка и оптимизация рисков функционирования распределенных компьютерных систем

Ю. П. Степин<sup>а</sup>, Д. Г. Леонов, Т. М. Папилина, О. А. Степанкина

РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина,  
Россия, 119991, г. Москва, Ленинский проспект, д. 65

E-mail: <sup>а</sup> stepin.y@gubkin.ru

*Получено 08.07.2020, после доработки — 11.08.2020.  
Принято к публикации 26.08.2020.*

В статье рассматривается проблема надежности эксплуатации открытой интеграционной платформы, обеспечивающей взаимодействие различных программных комплексов моделирования режимов транспорта газа, с учетом предоставления доступа к ним, в том числе через тонких клиентов, по принципу «программное обеспечение как услуга». Математически описаны функционирование, надежность хранения, передачи информации и реализуемость вычислительного процесса системы, что является необходимым для обеспечения работы автоматизированной системы диспетчерского управления транспортом нефти и газа. Представлено системное решение вопросов моделирования работы интеграционной платформы и тонких клиентов в условиях неопределенности и риска на базе метода динамики средних теории марковских случайных процессов. Рассматривается стадия стабильной работы — стационарный режим работы цепи Маркова с непрерывным временем и дискретными состояниями, которая описывается системами линейных алгебраических уравнений Колмогорова–Чепмена, записанных относительно средних численностей (математических ожиданий) состояний объектов исследования. Объектами исследования являются как элементы системы, присутствующие в большом количестве (тонкие клиенты и вычислительные модули), так и единичные (сервер, сетевой менеджер (брокер сообщений), менеджер технологических схем). В совокупности они представляют собой взаимодействующие Марковские случайные процессы, взаимодействие которых определяется тем, что интенсивности переходов в одной группе элементов зависят от средних численностей других групп элементов.

Через средние численности состояний объектов и интенсивностей их переходов из состояния в состояние предлагается многокритериальная дисперсионная модель оценки риска (как в широком, так и узком смысле, в соответствии со стандартом МЭК). Риск реализации каждого состояния параметров системы вычисляется как среднеквадратическое отклонение оцениваемого параметра системы объектов (в данном случае — средние численности и вероятности состояний элементов открытой интеграционной платформы и облака) от их среднего значения. На основании определенной дисперсионной модели риска функционирования элементов системы вводятся модели критериев оптимальности и рисков функционирования системы в целом. В частности, для тонкого клиента рассчитываются риск недополучения выгоды от подготовки и обработки запроса, суммарный риск потерь, связанный только с непроизводительными состояниями элемента, суммарный риск всех потерь от всех состояний системы. Для полученной многокритериальной задачи оценки рисков предлагаются модели (схемы компромисса) выбора оптимальной стратегии эксплуатации.

Ключевые слова: многокритериальная оценка, риск, стратегия эксплуатации, динамика средних, стационарный режим цепи Маркова, облачные технологии, открытая интеграционная платформа

UDC: 681.5: 519.86

## System modeling, risks evaluation and optimization of a distributed computer system

Yu. P. Stepin<sup>a</sup>, D. G. Leonov, T. M. Papilina, O. A. Stepankina

National University of Oil and Gas “Gubkin University”,  
65 Leninsky prospect, Moscow, 119991, Russia

E-mail: <sup>a</sup> stepin.y@gubkin.ru

*Received 08.07.2020, after completion — 11.08.2020.*

*Accepted for publication 26.08.2020.*

The article deals with the problem of a distributed system operation reliability. The system core is an open integration platform that provides interaction of varied software for modeling gas transportation. Some of them provide an access through thin clients on the cloud technology “software as a service”. Mathematical models of operation, transmission and computing are to ensure the operation of an automated dispatching system for oil and gas transportation. The paper presents a system solution based on the theory of Markov random processes and considers the stable operation stage. The stationary operation mode of the Markov chain with continuous time and discrete states is described by a system of Chapman–Kolmogorov equations with respect to the average numbers (mathematical expectations) of the objects in certain states. The objects of research are both system elements that are present in a large number – thin clients and computing modules, and individual ones – a server, a network manager (message broker). Together, they are interacting Markov random processes. The interaction is determined by the fact that the transition probabilities in one group of elements depend on the average numbers of other elements groups.

The authors propose a multi-criteria dispersion model of risk assessment for such systems (both in the broad and narrow sense, in accordance with the IEC standard). The risk is the standard deviation of estimated object parameter from its average value. The dispersion risk model makes possible to define optimality criteria and whole system functioning risks. In particular, for a thin client, the following is calculated: the loss profit risk, the total risk of losses due to non-productive element states, and the total risk of all system states losses.

Finally the paper proposes compromise schemes for solving the multi-criteria problem of choosing the optimal operation strategy based on the selected set of compromise criteria.

Keywords: multicriteria assessment, risk, exploitation strategy, medium dynamics, Markov chain stationary mode, cloud technology, open integration platform

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2020, vol. 12, no. 6, pp. 1349–1359 (Russian).

## Введение

Нефтегазовое производство занимает ключевое место в топливно-энергетическом комплексе России и характеризуется необходимостью управлением сложными системами, которые функционируют в условиях неопределенности и риска, в том числе с непрерывными технологическими процессами, к которым относятся, в частности, системы трубопроводного транспорта нефти и газа. Эффективное управление этими системами немислимо без использования средств автоматизации и внедрения в работу автоматизированной системы диспетчерского управления (АСДУ) цифровых технологий [Григорьев, Костогрызлов, 2016; Шмаль и др., 2019]. Одной из важнейших составляющих АСДУ являются специализированные программно-вычислительные комплексы (ПВК), решающие технологические, оптимизационные и другие задачи транспорта нефти и газа.

В основе разработки ПВК лежат исследования в области системного анализа, автоматического и автоматизированного управления, теории принятия решений, оптимального управления сложными системами, современных цифровых информационных технологий [Леонов, 2017], а также математический аппарат марковских случайных процессов [Вентцель, 1980], в том числе теория массового обслуживания и метод динамики средних, применяемый для оценки эффективности и надежности систем [Тараканов и др., 1974; Carpin et al., 2016; Turuk et al., 2016; Lawan et al., 2018]. Данная работа посвящена развитию методологии совершенствования этих моделей на основе методов системного анализа, метода динамики средних, методов оптимизации и многокритериального ранжирования решений для обеспечения возможностей учета, оценки и анализа рисков и эффективности функционирования ПВК в части работы открытой интеграционной платформы для АСДУ [Леонов, Степин, 2017] и тонких клиентов ПВК, работающих на базе технологии облачных вычислений [Папилина и др., 2016].

## Постановка и модели решения задачи

### *О моделях оценки комплексных показателей надежности ОТ и ОИП*

Известно, что в настоящее время для АСДУ характерным является тот факт, что на смену классическому программному обеспечению (ПО), ориентированному на локальное использование на рабочих станциях, приходит ПО, предоставляющее распределенные информационно-вычислительные услуги, то есть реализованное на базе в том числе облачных технологий и открытой интеграционной платформы [Леонов и др., 2019]. Облачные технологии (ОТ) и открытые интеграционные платформы (ОИП) дают возможность потребителю самостоятельно получать доступ с практически любого клиентского устройства и к только нужному набору услуг в любое время, без необходимости взаимодействия с поставщиком услуг. Поставщики услуг объединяют ресурсы в единый пул с возможностью динамического перераспределения ресурсов в зависимости от количества клиентов. Объем предоставляемых услуг конкретному клиенту контролируется автоматически и может быть изменен по требованию клиента. При этом поставщиком ведется учет объемов предоставленных услуг. В структуре облачной системы, ориентированной на работу в системе диспетчерского управления транспортом газа, выделяется несколько ключевых компонентов [Папилина и др., 2016]:

- 1) прикладной уровень, отвечающий за выполнение бизнес-функций;
- 2) тонкие клиенты, обеспечивающие доступ к облаку;
- 3) транспортный уровень, организующий информационный обмен между компонентами;
- 4) менеджеры, осуществляющие динамическое управление загрузкой вычислительных кластеров и выполняемых на них специализированного ПО прикладного уровня;
- 5) административный уровень, отвечающий за логическую связь между компонентами, контроль прав доступа пользователей к определенному набору услуг, хранение сессий и преобразование информации при необходимости.

Развитие архитектуры разрабатываемого в РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина ПВК «Веста» создало предпосылки для преобразования его транспортной подсистемы в основу ОИП. ОИП стандартизирует формат и протоколы обмена данными на основе открытого программного интерфейса (Application Programming Interface, API) и представляет собой распределенную гетерогенную компьютерную среду, обеспечивающую общий открытый интерфейс передачи данных в унифицированном формате [Леонов, Степин, 2017]. Применение ОИП позволяет объединить разнородные программные комплексы, а также использовать современные информационные технологии, такие как распределенные вычисления и облачные технологии, а также подключить тонких и мобильных клиентов. В общем случае работа ОИП может быть представлена в виде совокупности взаимодействующих марковских случайных процессов [Вентцель, 1980; Степин, 2016], являющейся обобщением схемы взаимодействия случайных процессов, описывающих функционирование системы облачных вычислений в АСДУ, а также модели, описывающей взаимодействие «клиент–сервер». В частности, с точки зрения организации взаимодействия компоненты ОИП разбиваются на несколько групп (отдельные клиенты в зависимости от реализации могут работать как в асинхронном, так и синхронном режиме):

- конечные компоненты, функционирующие в асинхронном режиме (тонкие web-клиенты, диспетчеры модулей и схем, расчетные комплексы, унаследованные клиенты);
- конечные компоненты, функционирующие в синхронном режиме (тонкие и унаследованные клиенты);
- транзитные компоненты, функционирующие в асинхронном режиме (сетевой брокер, адаптеры унаследованных приложений, интерфейсы тонких клиентов).

Наряду с представленными выше достоинствами ОТ и ОИП для АСДУ существуют и трудности, связанные с риском эксплуатации распределенных систем. Можно выделить некоторые из них:

- постоянное соединение с сетью: для получения доступа к услугам облака необходимо постоянное соединение с сетью Интернет;
- конфиденциальность: конфиденциальность данных, хранимых на публичных облаках, в настоящее время вызывает много споров, но в большинстве случаев эксперты сходятся в том, что не следует хранить наиболее ценные для компании документы на публичном облаке, так как пока нет технологии, которая бы гарантировала 100%-ную конфиденциальность хранимых данных;
- надежность: если вы потеряли информацию, хранимую в облаке, то вы ее потеряли навсегда;
- безопасность: облако само по себе является достаточно надежной системой, однако при проникновении на него злоумышленник получает доступ к огромному хранилищу данных;
- использование систем виртуализации: в качестве гипервизора используются ядра стандартных ОС, таких как Linux, Windows и др., что позволяет использовать их уязвимость.

В данной работе рассматривается проблема, обобщающая проблему надежности функционирования ОТ, ОИП в части надежности хранения, передачи информации и реализуемости вычислительного процесса этих систем. Решение одного из вопросов этой проблемы было рассмотрено в [Папилина и др., 2016; Леонов, Степин, 2017], где на основе метода динамики средних теории марковских случайных процессов были получены выражения для вычисления комплексных показателей надежности этих систем — коэффициентов готовности и технического использования как отдельных их частей, так и систем в целом. В частности, с учетом введенных состояний элементов систем ОТ, ОИП и соответствующих систем дифференциальных уравнений, рассчитываются как частные коэффициенты готовности для web-приложения, сетевого менеджера и менеджера схем, так и общий (интегральный) коэффициент готовности  $K_r$  следующим образом:

$$K_r = K_r^W * K_r^N * K_r^M, \quad (1)$$

где

$$\begin{aligned} K_r^W &= p_0^W + p_1^W + p_2^W, \\ K_r^N &= p_0^N + p_1^N + p_2^N, \\ K_r^M &= p_0^M + p_1^M + p_2^M, \end{aligned} \quad (2)$$

в которых

$K_r$  — коэффициент готовности распределенной компьютерной системы;

$K_r^W$  — коэффициент готовности web-приложения;

$K_r^N$  — коэффициент готовности сетевого менеджера;

$K_r^M$  — коэффициент готовности менеджера схем;

$p_i^W$ ,  $p_i^N$ ,  $p_i^M$  — вероятности нахождения компонентов системы в соответствующих состояниях (рис. 1).

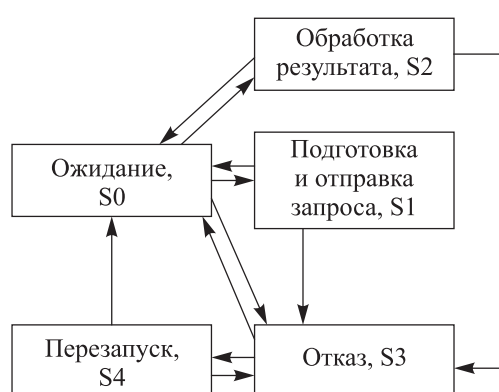


Рис. 1. Граф состояний для тонкого клиента / расчетного комплекса

Базируясь на этих результатах, рассмотрим теперь построение моделей оценки рисков функционирования ОТ и ОИП.

### Модели оценки рисков функционирования ОТ и ОИП

В общем случае, согласно [Вишняков, Радаев, 2008], *риск* — это мера количественного измерения опасности, представляющая собой векторную величину, включающую следующие основные показатели: величину ущерба от воздействия того или иного опасного фактора; вероятность возникновения рассматриваемого опасного фактора; неопределенность в величинах как ущерба, так и вероятности реализации опасного фактора. Опираясь на общую теорию рисков [Вишняков, Радаев, 2008] и стандарты МЭК [ГОСТ Р МЭК 61508-6-2012, 2012; ГОСТ Р МЭК 61511-1-2018, 2018], в данной работе предлагается под *риском* (в широком смысле) понимать среднее значение многокритериальной оценки ущерба при функционировании системы ОТ и ОИП от появлений конкретного отрицательного фактора воздействия (вида риска) за установленный период времени  $[0, t]$  (часто  $t = 1$  год или единичный принятый для рассмотрения период времени — епр); риск от  $i$ -го опасного последствия оценивается по выражению

$$R_i(t) = S_i \Phi_i t. \quad (3)$$

Если  $t = 1$  год (епр), то

$$R_i = S_i \Phi_i, \quad (4)$$

где  $S_i$  — средний ущерб, связанный с полным устранением одного  $i$ -го негативного последствия;  $\Phi_i$  — частота появления  $i$ -го состояния или среднее число появлений этого последствия в год. Часто в специальной литературе [Вишняков, Радаев, 2008; ГОСТ Р МЭК 61508, 2008] под *рис-*

ком (в узком смысле) от  $i$ -го опасного последствия понимается величина  $\Phi_i$  — частота (вероятность) появления опасного последствия, при этом величина  $\Phi_i$  именуется риском или вероятностью возникновения опасного события. Обычно величина  $\Phi_i$  используется в качестве риска в ситуации, когда отсутствует информация о величине ущерба  $S_i$ . Будем здесь рассматривать модель риска в широком смысле, связанную с состояниями элементов. С учетом моделей функционирования ОТ и ОИП, разработанных в работах [Папилина и др., 2016; Леонов, Степин, 2017], в данной работе под риском будем понимать среднее квадратическое отклонение оцениваемого параметра системы объектов (в данном случае — средних численностей и вероятностей состояний элементов ОТ и ОИП) от его среднего значения — дисперсионная модель риска [Математические методы..., 2008; Степин, Трахтенгерц, 2007]. В частности, риски, связанные с реализацией описанного выше функционирования системы элементов ОТ и ОИП, здесь и далее, согласно методу динамики средних, есть среднее квадратическое отклонение от дисперсии средней численности  $j$ -го состояния —  $m_j$ , которое определяется по следующим выражениям:

$$\text{математическое ожидание: } m_j = N * p_j, \quad (5)$$

$$\text{дисперсия } m_j: \quad D_j = N * p_j * (1 - p_j). \quad (6)$$

Здесь  $p_j$  — вероятность пребывания элемента в  $j$ -м состоянии в стационарном режиме работы системы (определяется из системы алгебраических уравнений, аналогичных системе уравнений динамики средних, записанных относительно вероятностей  $p_j$ ),  $N$  — количество элементов.

Тогда, исходя из выражений (5), (6), имеем также, что

$$D_j(m_j) = m_j * \left(1 - \frac{m_j}{N}\right). \quad (7)$$

С учетом этого риски, связанные с реализацией описанного выше функционирования системы элементов ОТ и ОИП, согласно методу динамики средних, есть среднее квадратическое отклонение от дисперсии средней численности  $j$ -го состояния объектов, которое определяется по выражениям

$$\sigma_j = C_j * \sqrt{D_j(m_j)} = C_j * \sqrt{m_j * \left(1 - \frac{m_j}{N}\right)}. \quad (8)$$

В выражении (9)  $C_j$  — это выгоды или потери, приходящиеся на единицу элементов ОТ, ОИП. Применительно к оценке рисков клиента  $C_j$  есть:  $C_1, C_2$  — выгоды, обеспечиваемые единицей функционирующего элемента, например, от выполнения запроса одного тонкого клиента в соответствии с рис. 1, а;  $C_0, C_3, C_4$  — потери, приходящиеся на единицу элемента (тонкого клиента) ОТ.

Система же уравнений динамики средних Колмогорова–Чепмена для клиентов, согласно [Папилина и др., 2016], следующая:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dm_0^B(t)}{dt} = -(\lambda_{01}^B + \lambda_{02}^B + \lambda_{03}^B)m_0^B(t) + \lambda_{10}^B m_1^B(t) + \lambda_{20}^B m_2^B(t) + \lambda_{30}^B m_3^B(t) + \lambda_{40}^B m_4^B(t), \\ \frac{dm_1^B(t)}{dt} = -(\lambda_{10}^B + \lambda_{13}^B)m_1^B(t) + \lambda_{01}^B m_0^B(t), \\ \frac{dm_2^B(t)}{dt} = -(\lambda_{20}^B + \lambda_{23}^B)m_2^B(t) + \lambda_{02}^B m_0^B(t), \\ \frac{dm_3^B(t)}{dt} = -(\lambda_{30}^B + \lambda_{34}^B)m_3^B(t) + \lambda_{03}^B m_0^B(t) + \lambda_{13}^B m_1^B(t) + \lambda_{23}^B m_2^B(t) + \lambda_{43}^B m_4^B(t), \\ \frac{dm_4^B(t)}{dt} = -(\lambda_{40}^B + \lambda_{43}^B)m_4^B(t) + \lambda_{34}^B m_3^B(t). \end{array} \right. \quad (9)$$

Здесь  $\lambda_{01}, \lambda_{10}, \lambda_{02}, \lambda_{20}$  — штатный режим работы;

$\lambda_{03}$  — внешний сбой (закрытие страницы);

$\lambda_{13}$  — неверные входные данные или отсутствие соединения;

$\lambda_{23}$  — некорректные данные от ПВК;

$\lambda_{30}$  — приложение корректно определяет и обрабатывает ошибку;

$\lambda_{34}$  — приложение не может определить или исправить ошибку;

$\lambda_{40}$  — после перезапуска ошибка устранена;

$\lambda_{43}$  — перезапуск не устраняет ошибку, необходимо исправление ПО.

Соответствующие значения  $\lambda_{ij}$  берутся из системных логов, системы отслеживания ошибок и логов приложения.

В общем случае [Степин, 2016; Степин, Трахтенгерц, 2007]  $C_j$  определяется не только в стоимостном выражении, так как это могут быть не только указанные выше выигрыши и потери, но также и социальные, репутационные, экологические, организационные и другие, то есть оценка  $C_j$  носит многокритериальный характер. Поэтому  $C_j$  возможно оценивать в условных единицах (баллах), например по 100-балльной шкале, которые получаются в том числе из реальных размерных значений показателей по методу базовых шкал, с соответствующей сверткой [Степин, 2016; Степин, 2018]. В упрощенном варианте, без рассмотрения репутационной и прочих составляющих, можно говорить о времени нахождения элемента в каждом состоянии, переведенном в денежный эквивалент. Например:

$C_0$  — 0 либо затраты на обеспечение работы инфраструктуры в режиме ожидания;

$C_1$  — прибыль от выполнения расчетной задачи;

$C_2$  — прибыль от работы с результатами расчета (визуализация, отчеты и т. д.);

$C_3$  — упущенная выгода и оплата работы команды разработчиков, если необходимо исправление программы;

$C_4$  — упущенная выгода.

Предлагаемая в данной работе дисперсионная модель оценки рисков [Математические методы..., 2008] позволяет выделить, например, следующие виды рисков эксплуатации тонкого клиента:

- риск недополучения выгоды от подготовки и обработки запроса (от состояний  $S_1$  и  $S_2$ ) — уменьшение дохода на величину  $\sigma_j$ ,  $j = 1, 2$ , по выражению (14); состояние ожидания  $S_0$  будем считать непроизводительным, так как, хотя ожидание и осуществляется в состоянии технической, принципиальной готовности системы к работе, в это время имеются накладные расходы;
- суммарный риск потерь, связанный только с непроизводительными состояниями элемента тонкого клиента ОТ и ОИП (от состояний  $S_0, S_3, S_4$ ) —  $\sigma_j$ ,  $j = 0, 3, 4$ , по выражению (15);
- суммарный риск всех потерь, выражение (16): недополучение выгоды в работе тонкого клиента (от состояний  $S_1, S_2$ ) плюс потери (затраты) от нефункционирования элементов, описывающих работу тонкого клиента (от состояний  $S_0, S_3, S_4$ ), — уменьшение дохода на величину  $\sigma_j$ ,  $j = 1, 2$ , по выражению (14) плюс потери от непроизводительных состояний  $\sigma_j$ ,  $j = 0, 3, 4$ , по выражению (15).

Если же в системе ОТ и ОИП рассматривать их единичные элементы, например серверные элементы, веб-приложения, то все проведенные рассуждения относительно дисперсионной модели риска его функционирования остаются справедливыми, с той лишь разницей, что для него записываются классические уравнения Колмогорова–Чепмена, а дисперсионная модель риска его состояний, очевидно, будет иметь вид

$$\text{математическое ожидание:} \quad m_j = p_j, \quad (10)$$

$$\text{дисперсия } m_j: \quad D_j = p_j * (1 - p_j). \quad (11)$$

Здесь  $p_j$  — вероятность пребывания единичного объекта в  $j$ -м состоянии в стационарном режиме работы,

$$\sigma_j = C_j * \sqrt{D_j(m_j)} = C_j * \sqrt{p_j * (1 - p_j)}. \quad (12)$$

Модели описанных выше видов рисков применительно к клиенту, которые, естественно, при проектировании и эксплуатации системы ОТ и ОИП должны минимизироваться, можно записать как соответствующие критерии оптимальности. Они имеют следующий вид:

- 1) максимизация дохода от числа функционирующих клиентов:

$$F_1 = C_1 * m_1 + C_2 * m_2 \rightarrow \max; \quad (13)$$

- 2) минимизация риска недополучения дохода (потери) от продуктивной работы клиентов:

$$F_2 = C_1 * \sqrt{D(m_1)} + C_2 * \sqrt{D(m_2)} \rightarrow \min; \quad (14)$$

- 3) минимизация суммы рисков потерь от непроизводительных состояний элемента «тонкий клиент» (состояния  $S_0, S_3, S_4$ ):

$$F_3 = C_0 * \sqrt{D(m_0)} + C_3 * \sqrt{D(m_3)} + C_4 * \sqrt{D(m_4)} \rightarrow \min; \quad (15)$$

- 4) минимизация риска всех потерь:

$$F_4 = C_0 * \sqrt{D(m_0)} + C_1 * \sqrt{D(m_1)} + C_2 * \sqrt{D(m_2)} + C_3 * \sqrt{D(m_3)} + C_4 * \sqrt{D(m_4)} \rightarrow \min. \quad (16)$$

Из смысла представленных выше критериев следует, что лицу, принимающему решение (ЛПР), необходимо рассматривать по крайней мере три двухкритериальные задачи «доход–риск» со следующим сочетанием критериев:  $F_1, F_2; F_1, F_3; F_1, F_4$ . Необходимо также решить три задачи минимизации рисков, то есть отдельно минимизация критериев  $F_2, F_3, F_4$ , и, наконец, только одну задачу максимизации дохода — критерий  $F_1$ . Задачи «доход–риск» решаются с привлечением понятия взвешивающей формулы [Математические методы..., 2008]:

$$\varphi(q, r) = q - r. \quad (17)$$

Таким образом, выбор ЛПР лучшего варианта работы ОТ и ОИП должен осуществляться путем их ранжирования по нижеследующим критериям, по выбранной схеме компромисса [Степин, 2016; Степин, 2018]:

$$\mathbf{F1} = \varphi(q, r) = q - r = F_1 - F_2 = C_2 * m_2 - C_2 * \sqrt{D(m_2)} \rightarrow \max,$$

$$\mathbf{F1} = \varphi(q, r) = q - r = F_1 - F_3 =$$

$$= C_2 * m_2 - C_0 * \sqrt{D(m_0)} - C_1 * \sqrt{D(m_1)} - C_3 * \sqrt{D(m_3)} - C_4 * \sqrt{D(m_4)} \rightarrow \max,$$

$$\mathbf{F3} = \varphi(q, r) = q - r = F_1 - F_4 =$$

$$= C_2 * m_2 - C_0 * \sqrt{D(m_0)} - C_1 * \sqrt{D(m_1)} - C_2 * \sqrt{D(m_2)} - C_3 * \sqrt{D(m_3)} - C_4 * \sqrt{D(m_4)} \rightarrow \max,$$

$$\mathbf{F4} = C_2 * \sqrt{D(m_2)} \rightarrow \min,$$

$$\mathbf{F5} = C_0 * \sqrt{D(m_0)} + C_1 * \sqrt{D(m_1)} + C_3 * \sqrt{D(m_3)} + C_4 * \sqrt{D(m_4)} \rightarrow \min,$$

$$\mathbf{F6} = C_0 * \sqrt{D(m_0)} + C_1 * \sqrt{D(m_1)} + C_2 * \sqrt{D(m_2)} + C_3 * \sqrt{D(m_3)} + C_4 * \sqrt{D(m_4)} \rightarrow \min,$$

$$\mathbf{F7} = C_2 * m_2 \rightarrow \max.$$



## Заключение

В итоге можно констатировать, что в данной работе предложена система взаимосвязанных математических моделей, включающая в себя:

- модель динамики средних теории марковских случайных процессов, которая позволяет моделировать техническое состояние, эффективность и риски эксплуатации программных блоков систем ОТ и ОИП (на примере тонких клиентов);
- дисперсионную модель многокритериальной оценки и анализа рисков эксплуатации объектов ОТ и ОИП, базирующуюся на стандартах Международной электротехнической комиссии и средних численностях состояний объектов и интенсивностях их перехода из состояния в состояние;
- модель формирования стратегий эксплуатации распределенной компьютерной системы, определяемую как сочетание и численное соотношение средних численностей состояний и интенсивностей переходов объектов ОТ и ОИП;
- модель линейного многокритериального математического программирования, позволяющую выбрать оптимальную стратегию эксплуатации по одному из заданных ЛПР схем компромисса критериев.

Разработанный комплекс моделей системной оптимизации обеспечивает в автоматизированном режиме работы возможность ЛПР: а) иметь ясное представление и анализировать источники рисков и эффективность эксплуатации системы; б) осуществить многокритериальную оценку рисков и эффективность функционирования системы ОТ и ОИП; в) определять и анализировать возможные варианты стратегий эксплуатации системы и рассчитывать лучшую из них, обеспечив необходимый компромисс между рисками и эффективностью.

## Список литературы (References)

- Вентцель Е. С. Исследование операций. — М.: Наука, 1980.  
*Wentzel E. S. Operations Research.* — Mir, 1983. (Original Russian ed.: *Ventsel E. S. Issledovanie operacij.* — Moscow: Nauka, 1980.)
- Вишняков Я. Д., Радаев Н. Н. Общая теория рисков. — М.: Академия, 2008.  
*Vishnyakov Ya. D., Radaev N. N. Obschaya teoriya riskov* [General risk theory]. — Moscow: Akademiya, 2008 (in Russian).
- ГОСТ Р МЭК 61508 «Функциональная безопасность систем электрических, электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью». 2012 [Электронный ресурс]. — URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200160087> (дата обращения: 18.05.2020).  
GOST R MEK 61508 “Funkcional'naya bezopasnost' sistem elektricheskikh, elektronnykh, programmiruemykh elektronnykh, svyazannykh s bezopasnost'yu” [Functional safety of electrical, electronic, programmable electronic systems related to safety]. 2012 [Elektronnyj resurs]. — URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200160087> (accessed: 18.05.2020) (in Russian).
- ГОСТ Р МЭК 61511 «Безопасность функциональная. Системы безопасности приборные для промышленных процессов». 2018 [Электронный ресурс]. — URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200160087> (дата обращения: 18.05.2020).  
GOST R MEK 61511 “Bezopasnost' funkcional'naya. Sistemy bezopasnosti pribornye dlya promyshlennykh processov” [Functional security. Instrument safety systems for industrial processes] 2018 [Elektronnyj resurs]. — URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200160087> (accessed: 18.05.2020) (in Russian).
- Григорьев Л. И., Костогрызов А. И. Актуальность и основы инновационного пути развития АСДУ // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. — 2016. — № 3.  
*Grigor'ev L. I., Kostogryzov A. I. Aktual'nost' i osnovy innovacionnogo puti razvitiya ASDU* [Relevance and fundamentals of the ADCS development innovative way] // *Avtomatizaciya, telemekhanizaciya i svyaz' v neftyanoj promyshlennosti.* — 2016. — No. 3 (in Russian).

- Леонов Д. Г.* Методы, модели и технологии разработки и интеграции распределенных гетерогенных программно-вычислительных комплексов в транспорте газа. — М.: Издательский центр РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина, 2017. — 196 с.  
*Leonov D. G.* Metody, modeli i tekhnologii razrabotki i integracii raspredelennyh geterogennyh programmno-vychislitel'nyh kompleksov v transporte gaza [Methods, models and technologies for developing and integrating distributed heterogeneous software and computing systems in gas transport]. — Moscow: Izdatel'skij centr RGU nefti i gaza (NIU) imeni I. M. Gubkina, 2017. — 196 p. (in Russian).
- Леонов Д. Г., Папилина Т. М., Степанкина О. А.* Интеграционная архитектура адаптируемого распределенного программного обеспечения для решения задач газоснабжения // CEUR WORKSHOP PROCEEDINGS Proceedings of the 6th International Conference Actual Problems of System and Software Engineering. 2019. — Moscow, 12–14 ноября 2019 г.: Sun SITE, 2019. — С. 259–270.  
*Leonov D. G., Papilina T. M., Stepankina O. A.* Integracionnaya arhitektura adaptiruемого raspredelyonnogo programmnogo obespecheniya dlya resheniya zadach gazosnabzheniya [The Integration Architecture of Adaptable Distributed Software for Gas Supply Tasks Solving] // CEUR WORKSHOP PROCEEDINGS Proceedings of the 6th International Conference Actual Problems of System and Software Engineering. 2019. — Moscow, 12–14 noyabrya 2019 g.: Sun SITE, 2019. — P. 259–270 (In Russian).
- Леонов Д. Г., Степин Ю. П.* Моделирование и оценка показателей функционирования открытой интеграционной платформы для АСДУ // Управление качеством в нефтегазовом комплексе. — 2017. — № 3–4. — С. 18–22.  
*Leonov D. G., Stepin Yu. P.* Modelirovanie i ocenka pokazatelej funkcionirovaniya otkrytoj integracionnoj platformy dlya ASDU [Modeling and evaluation of performance indicators of an open integration platform for ADCS] // Upravlenie kachestvom v neftegazovom komplekse. — 2017. — Nos. 3–4. — P. 18–22 (in Russian).
- Математические методы и модели исследования операций / под ред. В. А. Колемаева. — М.: «ЮНИТИ-ДАНА», 2008. — 592 с.  
Matematicheskie metody i modeli issledovaniya operacij [Mathematical methods and models of operations research] / pod red. V. A. Kolemaeva. — Moscow: YUNITI-DANA, 2008. — 592 p. (in Russian).
- Папилина Т. М., Леонов Д. Г., Степин Ю. П.* Моделирование и оценка эффективности функционирования системы облачных вычислений в АСДУ // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. — 2016. — № 7. — С. 29–33.  
*Papilina T. M., Leonov D. G., Stepin Yu. P.* Modelirovanie i ocenka effektivnosti funkcionirovaniya sistemy oblachnyh vychislenij v ASDU [Modeling and evaluating the performance of a cloud computing system in ADCS] // Avtomatizaciya, telemekhanizaciya i svyaz' v neftyanoj promyshlennosti. — 2016. — No. 7. — P. 29–33 (in Russian).
- Степин Ю. П.* Выбор стратегий обслуживания технологического оборудования на объектах нефтегазовой отрасли в условиях неопределенности и риска // Труды Российского государственного университета нефти и газа имени И. М. Губкина. — 2016. — № 1/282. — С. 106–121.  
*Stepin Yu. P.* Vybor strategij obsluzhivaniya tekhnologicheskogo oborudovaniya na ob'ektah neftegazovoj otrasli v usloviyah neopredelennosti i riska [Choosing strategies for equipment service process at oil and gas facilities under conditions of uncertainty and risk] // Trudy Rossijskogo gosudarstvennogo universiteta nefti i gaza imeni I. M. Gubkina. — 2016. — No. 1/282. — P. 106–121 (in Russian).
- Степин Ю. П.* Компьютерная поддержка формирования, многокритериального ранжирования и оптимизации управленческих решений в нефтегазовой отрасли. — М.: Недра, 2016. — 421 с.  
*Stepin Yu. P.* Komp'yuternaya podderzhka formirovaniya, mnogokriterial'nogo ranzhirovaniya i optimizacii upravlencheskih reshenij v neftegazovoj otrasli [Computer support for the formation, multi-criteria ranking and optimization of management decisions in the oil and gas industry]. — Moscow: Nedra, 2016. — 421 p. (in Russian).
- Степин Ю. П.* Проблемы и модели многокритериальной оценки рисков и эффективности разработки метаногольных месторождений. Ч. I // Труды Российского государственного университета нефти и газа имени И. М. Губкина. — 2018. — № 4/293. — С. 154–171.  
*Stepin Yu. P.* Problemy i modeli mnogokriterial'noj ocenki riskov i effektivnosti razrabotki metanougol'nyh mestorozhdenij [Problems and models of multi-criteria risk assessment and efficiency of development of methane coal fields]. Ch. I // Trudy Rossijskogo gosudarstvennogo universiteta nefti i gaza imeni I. M. Gubkina. — 2018. — No. 4/293. — P. 154–171 (In Russian).
- Степин Ю. П., Трахтенгерц Э. А.* Компьютерная поддержка управления нефтегазовыми технологическими процессами и производствами. Кн. 1. — М.: Вектор ТиС, 2007. — 384 с.

- Stepin Yu. P., Trahtengerc E. A.* Komp'yuternaya podderzhka upravleniya neftegazovymi tekhnologicheskimi processami i proizvodstvami [Computer support for oil and gas technological processes and production management]. Kn. 1. — Moscow: Vektor TiS, 2007. — 384 p. (in Russian).
- Стрельченко В. В., Степин Ю. П.* Метан угольных пластов. — М.: ИЦ РГУ нефти и газа. — 2018.  
*Strel'chenko V. V., Stepin Yu. P.* Metan ugol'nykh plastov [Coal bed methane]. — Moscow: IC RGU nefiti i gaza. — 2018 (in Russian).
- Тараканов К. В., Овчаров Л. А., Тырышкин А. Н.* Аналитические методы исследования систем. — М.: Советское радио, 1974. — 240 с.  
*Tarakanov K. V., Ovcharov L. A., Tyryshkin A. N.* Analiticheskie metody issledovaniya system [Analytical methods for the systems study]. — Moscow: Sovetskoe radio, 1974. — 240 p. (in Russian).
- Шмаль Г. И., Григорьев Л. И., Кершенбаум В. Я., Леонов Д. Г.* Цифровая экономика нефтяного производства // Нефтяное хозяйство. — 2019. — № 1. — С. 100–103.  
*Shmal' G. I., Grigor'ev L. I., Kershenbaum V. Ya., Leonov D. G.* Cifrovaya ekonomika neftyanogo proizvodstva [Digital economy of oil production] // Neftyanoe hozyajstvo. — 2019. — No. 1. — P. 100–103 (in Russian).
- Carpin S., Chow Y., Pavone M.* Risk aversion in finite Markov Decision Processes using total cost criteria and average value at risk // 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Stockholm, 2016. — P. 335–342. — DOI: 10.1109/ICRA.2016.7487152
- Lawan A., Abdullahi J., Yusuf I.* Enhanced Markov-based model for the availability analysis of distributed software and hardware systems // Journal of Physics: Conference Series. — 2018. — DOI: 10.1088/1742-6596/1132/1/012066
- Turuk A. K., Sahoo B., Addya S. K.* Resource Management and Efficiency in Cloud Computing Environments. — IGI Global, 2017. — 352 p.

