

С.З. КУРАКИН, А.Ю. ОНУФРЕЙ, А.В. РАЗУМОВ
**ИССЛЕДОВАНИЕ ВАРИАНТОВ ПОСТРОЕНИЯ
ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ
СЕТЕВЫХ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМ МАССОВОГО
ОБСЛУЖИВАНИЯ**

Куракин С.З., Онуфрей А.Ю., Разумов А.В. Исследование вариантов построения информационно-управляющих систем на основе сетевых моделей систем массового обслуживания.

Аннотация. Одним из направлений дальнейшего совершенствования и повышения эффективности применения технических объектов при решении ими целевых задач является применение информационно-управляющих систем (ИУС) для управления сложными техническими объектами. Существующие современные ИУС представляют собой комплекс аппаратно-программных средств, предназначенных для сбора, обработки и хранения информации и управления. В условиях наличия большого количества информации, противоречивых факторов, влияющих на качество управления, принятие обоснованных и своевременных решений в процессе управления невозможно без применения ИУС. Разрабатываемые ИУС, как правило, являются специализированными системами и проектируются для решения конкретных задач. В связи с этим разработка и проектирование ИУС должны проводиться с учетом взаимосвязи с целевыми показателями и особенностями объектов управления, а также результатами всестороннего анализа информации о параметрах ИУС, влияющих на показатели их эффективности. Использование математических моделей для исследования вариантов построения ИУС является основой проектирования и разработки устройств и подсистем ИУС. Разрабатываемые в настоящее время модели ИУС, как правило, позволяют проводить исследования для одностадийных процессов управления с наличием в системе однотипных объектов обслуживания. В то же время современные технические объекты и системы управления представляют собой сложные комплексы с циклически повторяющимися процессами управления разнотипными средствами. Как правило, в таких комплексах имеется набор параллельно работающих устройств (каналов управления), обеспечивающих управление разнотипными объектами на различных стадиях обработки информации. В этом случае структуру ИУС необходимо представлять в виде многофазной многоканальной технической системы, в которой происходит процесс одновременного управления несколькими объектами различных типов. В связи с этим целью статьи является разработка и исследование математической модели ИУС с двумя фазами обработки и наличием определенного количества обслуживающих разнотипных устройств. Основой модели является многофазная сетевая модель системы массового обслуживания. Исследование модели позволяет выбрать вариант построения ИУС, в частности выбрать оптимальное количество каналов обработки для различных типов объектов по критерию оптимальности с учетом ограничений по стоимости и времени обслуживания. Разработан алгоритм выбора варианта построения ИУС и приведен пример расчета количества каналов обработки в двухфазной системе при управлении тремя типами объектов.

Ключевые слова: информационно-управляющая система, математическое моделирование, сетевая многоканальная система массового обслуживания, выбор варианта построения, критерии оптимальности.

1. Введение. В настоящее время информационно-управляющие системы (ИУС) находят все более широкое применение в системах управления сложными техническими объектами. Современные ИУС представляют собой комплекс аппаратно-программных средств, предназначенных для сбора, обработки и хранения информации и управления. Основное предназначение ИУС заключается в обеспечении требуемой эффективности работы объектов управления при решении ими целевых задач. В условиях наличия большого количества информации, противоречивых факторов, влияющих на качество управления, принятие обоснованных и своевременных решений в процессе управления невозможно без применения ИУС. Разрабатываемые в настоящее время ИУС являются в большинстве своём специализированными системами и проектируются для решения конкретных задач независимо от того, что будет лежать в основе их реализации: специализированный микроконтроллер, вычислительная сеть или иные вычислительные средства. В связи с этим разработка и проектирование ИУС является важной научно-технической задачей, требующей всестороннего анализа информации об объектах управления, взаимосвязи элементов ИУС в процессе функционирования, структурных параметров ИУС и внешних факторов, влияющих на показатели эффективности управления.

Данному вопросу посвящено довольно большое количество работ отечественных и зарубежных авторов. Так в работах [1 – 5] рассматриваются вопросы построения ИУС и методического обеспечения для организации проектирования. В работах [1, 2] предложен научно-методический аппарат обоснования структуры информационно-управляющих систем, проведена вербальная и формализованная постановки задачи исследования, определены временные и стоимостные ограничения при выборе решений по созданию ИУС, предложены алгоритмы решения задач, основанные на применении методов оптимизации. В работах [3 – 5] показаны особенности проектирования ИУС на примере комплексов управления БПЛА [3], где предложен метод синтеза информационно-управляющей системы на основе сетцентрического подхода и представлена структура информационно-управляющей системы управления лесохозяйственным комплексом с использованием подсистемы поддержки принятия решения [4], рассматриваются подходы к проведению синтеза распределенных ИУС [5]. В работах [6 – 8] рассматриваются вопросы, связанные с непосредственной разработкой ИУС. Предлагается учитывать при построении ИУС надежность оборудования систем управления и использовать динамическую

избыточности ресурсов в процессе функционирования [6, 7]. В работе [8] для оценки функциональной устойчивости элементов структуры ИУС предлагается использовать теорию полумарковских процессов. Часть работ посвящена анализу и оценке эффективности применения ИУС [9 – 11]. Предлагается рассматривать ИУС, как сложную техническую систему, при оценке эффективности которой необходимо учитывать иерархию построения и показатели эффективности процессов управления на различных уровнях иерархии ИУС [9, 10].

В [11] предложено описывать СУ в виде ориентированного графа и способ формализации задачи выбора варианта построения ИУС. Большое количество работ посвящено моделированию процессов управления в ИУС и разработки моделей расчета показателей результативности применения ИУС [12 – 32]. В работах [12 – 14] разработаны математические модели многостадийных процессов обслуживания произвольного количества заданий в конвейерных системах, а в работе [13] предложена сетевая модель процесса управления образовательной деятельностью вуза.

В работах [15 – 17] предлагается использовать для моделирования математический аппарат СМО на примере одноканальной системы массового обслуживания с приоритетами и повторным обслуживанием заявок [15]. Такие системы моделируют многие реальные ситуации, в частности, телекоммуникационные системы с протоколами множественного доступа при наличии коллизий CSMA/CD [16]. Проведены исследования различных способов формирования порядков выполнения пакетов заданий в многостадийных системах [17].

В работах [18 – 24] исследуются вопросы выбора пропускных способностей каналов связи. Разработана аналитическая модель транспортной сети связи, которая предполагает разбиение исходной сети на отдельные фрагменты, анализируемые независимо друг от друга с помощью систем массового обслуживания [18]. Проведенный анализ аналитических моделей сетей связи, основанных на математическом аппарате сетей массового обслуживания [19 – 24], показал, что они не позволяют учитывать особенности переноса трафика различного приоритета. В то же время метод декомпозиции, представленный в [19], позволяет описать исходную сеть связи с коммутацией пакетов в виде множества взаимодействующих систем массового обслуживания (СМО), входные и выходные процессы которых связаны между собой на уровне параметров.

В работах [25 – 30] предлагаются методы совместной обработки разнородных исходных данных в ЛВС. Описываются модели и методы построения сети в условиях недостатка данных, дается описание структуры ЛВС, включающее сведения об управляемых элементах и связях иерархии и передачи данных между ними. Работы [31, 11] посвящены выбору вариантов построения технических систем.

В [31] предлагается осуществлять выбор структуры на основе кластеризации Парето оптимальных решений в многомерном критериальном пространстве с использованием генетических алгоритмов, а в [11] выбор структуры проводится на основе двухступенчатой процедуры оптимизации, включающей выбор оптимального базового варианта на основе аналитического моделирования и дальнейшего его усовершенствования на имитационных моделях в соответствии с выбранным критерием оптимальности.

Анализ представленных работ показывает, что для исследования вариантов построения ИУС возможны различные подходы и методы моделирования. Большинство из них соответствуют цели исследования и особенностям исследуемых объектов. В данной статье для моделирования процессов управления в ИУС с двумя этапами обработки данных предлагается использовать двухфазную сетевую модель системы массового обслуживания (СМО). Обусловлено это особенностями обслуживания объектов в перспективных ИУС, в которых порядок обслуживания заявок представляет собой несколько последовательно повторяющихся циклов обслуживания с выполнением однотипных задач. Поэтому для моделирования таких процессов наиболее предпочтительным математическим аппаратом исследования являются сетевые модели СМО.

В связи с этим целью статьи является обоснование вариантов построения ИУС на основе моделирования процессов её функционирования в виде двухфазной сетевой модели СМО.

Для решения поставленной задачи необходимо провести формализованную постановку задачи исследования.

2. Постановка задачи выбора варианта построения информационно-управляющей системы. Рассмотрим процесс проектирования информационно-управляющей системы F , предназначенной для обслуживания объектов в области D за заданное время $T_{\text{зад}}$. Объекты в зависимости от своих характеристик могут относиться к определенному i -му типу ($i = \overline{1, I}$) и с различными интервалами времени входят в область D . При этом за время $T_{\text{зад}}$

в область D поступит множество объектов, количество которых характеризуется вектором $M = \{m_i\}, i = \overline{1, I}$, где m_i – математическое ожидание количества объектов i -го типа, I – количество разных типов объектов.

Обслуживание объектов производится в два этапа. На первом этапе объекты обслуживаются в подсистеме S , в которой решается задача обнаружения и распознавания объектов, а на втором этапе – в подсистеме Z , в которой решается задача обработки данных об объектах. При этом выходной поток обслуженных объектов подсистемы S является входным потоком для подсистемы Z .

Подсистемы S и Z состоят из определенного количества обслуживающих средств. При этом в подсистеме S все обслуживающие средства подразделяются на группы однотипных средств и характеризуются вектором $K^S = \{k_j^S\}, j = \overline{1, J}$, где k_j^S – количество однотипных средств j -го типа, отличающихся по своим характеристикам и показателям качества обслуживания, J – количество типов обслуживающих средств в подсистеме S . В подсистеме Z все обслуживающие средства также подразделяются на группы однотипных средств и характеризуются вектором $K^Z = \{k_n^Z\}, n = \overline{1, N}$, где k_n^Z – количество однотипных средств n -го типа, отличающихся по своим характеристикам и показателям качества обслуживания, N – количество типов обслуживающих средств в подсистеме Z .

Заданы допустимые затраты $C_{\text{доп}}^S$ на создание подсистемы S и допустимые затраты $C_{\text{доп}}^Z$ на создание подсистемы Z .

Требуется выбрать вариант состава и количества обслуживающих устройств в подсистемах S и Z , при которых обеспечивается обслуживание максимального количества M объектов в области D за заданное время $T_{\text{зад}}$, что, в свою очередь, может быть обеспечено максимизацией пропускной способности системы.

Данная задача представляет собой оптимизационную задачу поиска варианта построения системы F , в которой в качестве критерия выбора оптимального варианта целесообразно использовать показатель $W(K^S, K^Z)$ пропускной способности системы, обеспечивающий максимальное количество обслуженных объектов в области D . Ограничениями при решении этой задачи являются затраты на разработку системы, включающие допустимые затраты $C_{\text{доп}}^S$ на разработку подсистемы S и допустимые затраты $C_{\text{доп}}^Z$ на разработку подсистемы Z , а также допустимое время $T_{\text{зад}}^S$ на обслуживание в подсистеме S и допустимое время $T_{\text{зад}}^Z$ на обслуживание в подсистеме Z .

С учетом ограничений задача выбора в формализованном виде может быть представлена следующим образом:

$$F(S, Z): v^* = \underset{v \in V}{\operatorname{arg\,max}} W(K_v^S, K_v^Z) \quad (1)$$

при ограничениях

$$C_v^S(K_v^S) \leq C_{\text{доп}}^S; \quad C_v^Z(K_v^Z) \leq C_{\text{доп}}^Z; \quad (2)$$

$$T_{\text{обсл}}^S(K_v^S) \leq T_{\text{зад}}^S; \quad T_{\text{обсл}}^Z(K_v^Z) \leq T_{\text{зад}}^Z, \quad (3)$$

где v – номер варианта построения подсистем S и Z ($v = \overline{1, V}$);
 V – общее количество вариантов построения подсистем S и Z ;
 K_v^S – значение вектора K^S для v -го варианта построения ИУС;
 K_v^Z – значение вектора K^Z для v -го варианта построения ИУС.

Для решения этой задачи целесообразно провести декомпозицию общей задачи на две подзадачи: подзадачу выбора варианта построения подсистемы S и подзадачу выбора варианта построения подсистемы Z .

2.1. Формализация задачи выбора состава обслуживающих средств подсистемы S . На первом этапе обслуживание объектов в информационно-управляющей системе F производится в подсистеме S .

Подсистема S состоит из множества обслуживающих средств, характеризуемых вектором K^S , элементами которого являются k_j^S – количества однотипных средств j -го типа ($j = \overline{1, J}$), отличающихся по своим характеристикам, заданных вектором характеристик $R = \{R_j\}$.

Заданы стоимости обслуживающих средств по каждому j -му типу средств C_j^S и допустимые затраты $C_{\text{доп}}^S$ на проектирование подсистемы S .

Входным потоком объектов на обслуживание для подсистемы S является входной поток объектов i -го типа, поступающих из области D . Каждый объект i -го типа описывается вектором характеристик $B = \{B_i\}$ и может быть обслужен средством j -го типа подсистемы S с вероятностью P_{ij}^S , $i = \overline{1, I}$, $j = \overline{1, J}$.

Требуется определить вариант $v^* \in V$ построения подсистемы S , характеризуемый вектором $K_{v^*}^S$, который определяет состав и количество средств каждого типа k_j^S , $j = \overline{1, J}$ и обеспечивает

максимальную пропускную способность $W(K_v^S, R, B)$ подсистемы S при обслуживании объектов из области D :

$$F(S^*): v^* = \arg \max_{v' \in V} W(K_{v'}^S, R, B) \quad (4)$$

при ограничениях

$$C^S = \sum_{j=1}^J C_j^S k_j^S \leq C_{\text{доп}}^S ; \quad (5)$$

$$T_{i \text{ обсл}}^S(K_v^S, R, B) \leq T_{\text{зад}}^S, \quad \forall i = \overline{1, I}. \quad (6)$$

Рассмотрим формализацию задачи выбора состава обслуживающих средств для подсистемы Z .

2.2. Формализация задачи выбора состава обслуживающих средств подсистемы Z . На втором этапе обслуживание объектов в информационно-управляющей системе F производится в подсистеме Z .

Подсистема Z состоит из множества обслуживающих средств, характеризуемых вектором K^Z , элементами которого являются k_n^Z – количества однотипных средств n -го типа ($n = \overline{1, N}$), отличающихся по своим характеристикам, заданных вектором характеристик $H = \{H_n\}$.

Заданы стоимости обслуживающих средств по каждому n -му типу средств C_n^Z и допустимые затраты $C_{\text{доп}}^Z$ на проектирование подсистемы Z .

Входным потоком объектов на обслуживание для подсистемы Z является выходной поток обслуженных объектов из подсистемы S . Каждый объект i -го типа описывается вектором характеристик $B = \{B_i\}$ и может быть обслужен средством n -го типа подсистемы Z с вероятностью $P_{in}^Z, i = \overline{1, I}, n = \overline{1, N}$.

Требуется определить вариант $v^{**} \in V$ построения подсистемы Z , характеризуемый вектором K_v^Z , который определяет состав и количество средств каждого типа $k_n^Z, n = \overline{1, N}$ и обеспечивает максимальную пропускную способность $W(K_v^Z, H, B)$ подсистемы Z при обслуживании объектов, поступивших после обслуживания в подсистеме S :

$$F(Z^*): v^{**} = \mathop{\text{arg max}}_{v^* \in V} W(K_v^Z, H, B) \quad (7)$$

при ограничениях

$$C^Z = \sum_{n=1}^N C_n^Z k_n^Z \leq C_{\text{доп}}^Z; \quad (8)$$

$$T_i^Z \text{обсл}(K_v^Z, H, B) \leq T_{\text{зад}}^Z, \forall i = \overline{1, I}. \quad (9)$$

Решение представленных формализованных постановок задач выбора состава обслуживающих средств в системе F представляет собой сложную комбинаторную задачу. Поэтому целесообразно рассмотреть подходы к решению этой задачи и на основе моделирования процессов обслуживания объектов в ИУС с помощью аппарата теории массового обслуживания.

3. Моделирование процессов обслуживания объектов в ИУС.

Рассмотрим процессы обслуживания объектов в системе F в терминах СМО с учетом ранее представленной формализованной постановки задачи. Учитывая, что процесс обслуживания представляет собой двухэтапную процедуру, то для её моделирования, целесообразно использовать сетевую двухфазную СМО, каждая фаза которой, в свою очередь, состоит из узлов определенного типа, что позволяет имитировать процесс обработки потока заявок в проектируемой ИУС (рисунок 1).

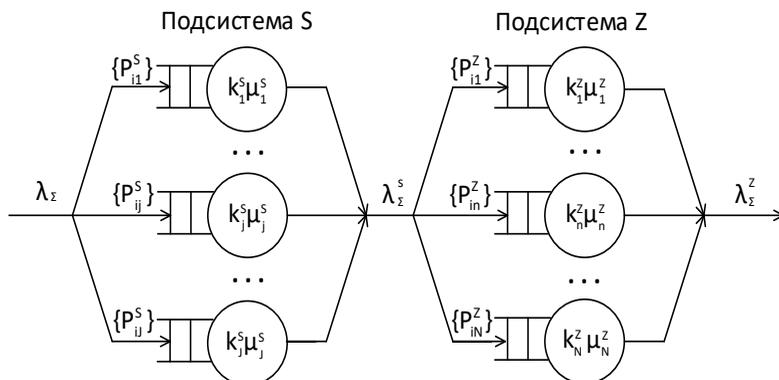


Рис. 1. Структура сетевой двухфазной многоканальной СМО, имитирующей процесс обработки потока заявок в проектируемой ИУС

В данной сетевой двухфазной СМО каждый узел представляет собой многоканальную СМО с очередью, в которой каналы моделируют процессы обслуживания однотипными устройствами в составе подсистем S и Z (рисунок 2).

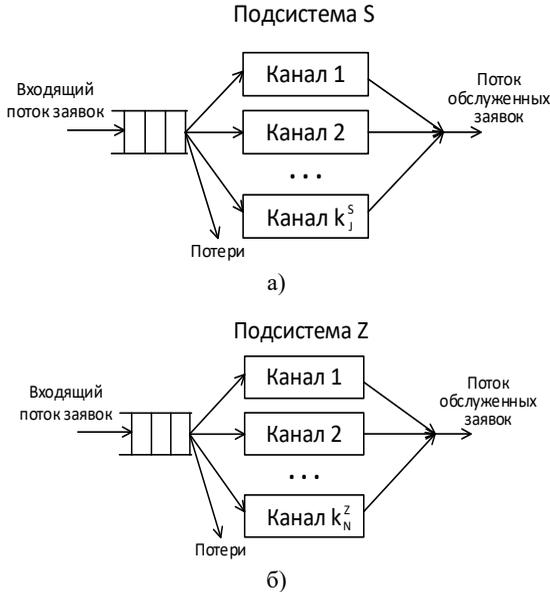


Рис. 2. Структура узла в виде многоканальной СМО в составе сетевой СМО: а) для подсистемы S ; б) для подсистемы Z

В соответствии с постановкой задачи на вход ИУС, представленной в виде сетевой двухфазной многоканальной СМО, поступает суммарный входной поток λ_{Σ} заявок, состоящий из заявок i -го типа:

$$\lambda_{\Sigma} = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_i + \dots + \lambda_l, \quad (10)$$

где λ_i – интенсивность входного потока заявок i -го типа ($i = \overline{1, l}$);
 $p_i = \lambda_i / \lambda_{\Sigma}$ – вероятность прихода заявки i -го типа ($i = \overline{1, l}$);
 $p_1 + p_2 + \dots + p_l = 1$ – условие нормировки.

Первая фаза сетевой СМО имитирует процесс функционирования подсистемы S , при этом в её состав входят узлы j -го типа ($j = \overline{1, J}$), каждый из которых представляет собой

многоканальную СМО с очередью. Каждый канал обслуживания в многоканальной СМО j -го типа ($j = \overline{1, J}$) моделирует работу однотипных информационных средств подсистемы S . Количество каналов обслуживания СМО соответствует количеству информационных средств j -го типа ($j = \overline{1, J}$).

При этом приведенная интенсивность обслуживания заявок в многоканальной СМО узлом j -го типа ($j = \overline{1, J}$) зависит от типа обслуживаемой заявки и определяется по формуле:

$$\mu_j^S = \sum_{i=1}^I P_{ij}^S k_j^S \mu_{ij}^S, \quad (11)$$

где P_{ij}^S – вероятность прихода заявки i -го типа ($i = \overline{1, I}$) в узел j -го типа ($j = \overline{1, J}$) в подсистеме S ;

k_j^S – количество каналов обслуживания узла j -го типа ($j = \overline{1, J}$) в подсистеме S ;

μ_{ij}^S – интенсивность обслуживания заявок i -го типа одним каналом обслуживания узла j -го типа в подсистеме S .

Вторая фаза сетевой СМО имитирует процесс функционирования подсистемы Z , при этом в её состав входят узлы n -го типа ($n = \overline{1, N}$), каждый из которых представляет собой многоканальную СМО с очередью. Каждый канал обслуживания в узле n -го типа ($n = \overline{1, N}$) моделирует работу однотипных обслуживающих средств подсистемы Z . Количество каналов обслуживания в узле соответствует количеству обслуживающих средств n -го типа ($n = \overline{1, N}$).

При этом приведенная интенсивность обслуживания заявок в многоканальной СМО узлом n -го типа ($n = \overline{1, N}$) зависит от типа обслуживаемой заявки и определяется по формуле:

$$\mu_n^Z = \sum_{i=1}^I P_{in}^Z k_n^Z \mu_{in}^Z, \quad (12)$$

где P_{in}^Z – вероятность прихода заявки i -го типа ($i = \overline{1, I}$) в узел n -го типа ($n = \overline{1, N}$) в подсистеме Z ;

k_n^Z – количество каналов обслуживания узла n -го типа ($n = \overline{1, N}$) в подсистеме Z ;

μ_{in}^Z – интенсивность обслуживания заявок i -го типа одним каналом обслуживания узла n -го типа в подсистеме Z .

Дисциплина обслуживания в узлах каждой из подсистем S и Z задается с учетом ограничений на время пребывания заявки в системе, при которых пришедшая на обслуживание заявка получает отказ при отсутствии наличия свободных каналов или, когда её время ожидания в очереди превышает допустимое значение.

Рассмотрим показатели эффективности многоканальных СМО, которые моделируют процессы обслуживания заявок в узлах сетевых СМО, моделирующих процессы функционирования подсистем S и Z .

В качестве критерия выбора количества каналов в узлах сетевых СМО целесообразно использовать показатель загрузки каналов обслуживания. При этом загрузка каналов обслуживания каждого из узлов j -го типа в подсистеме S определяется по формуле:

$$\rho_j^S = \sum_{i=1}^I \frac{\lambda_i}{k_j^S \mu_{ij}^S}, \quad (13)$$

где μ_{ij}^S – интенсивность обслуживания заявок i -го типа одним каналом обслуживания узла j -го типа в подсистеме S .

Загрузка каналов обслуживания каждого из узлов n -го типа в подсистеме Z определяется по формуле:

$$\rho_n^Z = \sum_{i=1}^I \frac{\lambda_i}{k_n^Z \mu_{in}^Z}, \quad (14)$$

где μ_{in}^Z – интенсивность обслуживания заявок i -го типа одним каналом обслуживания узла n -го типа в подсистеме Z .

Вероятность отказа в обслуживании заявок зависит от распределения вероятностей нахождения многоканальных СМО в определенных состояниях системы, которые нумеруются по числу заявок, находящихся в очереди и на обслуживании в системе. Далее будем рассматривать предельные вероятности состояний системы для стационарного режима работы.

В соответствии с [32] предельные вероятности состояний системы определяются следующими выражениями.

Вероятность нахождения многоканальных СМО (узлов), входящих в состав сетевых СМО, в свободном состоянии определяется:

- для узлов j -го типа в подсистеме S :

$$P_0^{Sj} = 1 / \sum_{r=1}^{k_j^S} \left(1 + \frac{\rho_j^r}{r!} \right); \quad (15)$$

- для узлов n -го типа в подсистеме Z :

$$P_0^{Zn} = 1 / \sum_{r=1}^{k_n^Z} \left(1 + \frac{\rho_n^r}{r!} \right). \quad (16)$$

Вероятность отказа в обслуживании заявок в каждом из узлов сетевых СМО равна вероятности того, что все каналы соответствующего узла заняты, и определяется:

- для узлов j -го типа в подсистеме S :

$$P_{\text{отк}}^{Sj} = \frac{\rho_j^{k_j^S}}{k_j^{S!}} P_0^{Sj}; \quad (17)$$

- для узлов n -го типа в подсистеме Z :

$$P_{\text{отк}}^{Zn} = \frac{\rho_n^{k_n^Z}}{k_n^{Z!}} P_0^{Zn}. \quad (18)$$

После определения вероятности отказа в обслуживании заявок в узлах сетевых СМО можно определить относительную пропускную способность:

- для узлов j -го типа в подсистеме S :

$$Q^{Sj} = 1 - P_{\text{отк}}^{Sj}; \quad (19)$$

- для узлов n -го типа в подсистеме Z :

$$Q^{Zn} = 1 - P_{\text{отк}}^{Zn}. \quad (20)$$

Так как узлы, входящие в состав сетевых СМО и представляющие собой отдельные многоканальные СМО, функционируют параллельно, то оценку относительной пропускной способности подсистем S и Z можно получить, используя соотношения для схемы параллельного соединения:

- для подсистемы S :

$$P_{\text{отк}}^S = 1 / \sum_{j=1}^J (1/P_{\text{отк}}^{Sj}); \quad (21)$$

- для подсистемы Z :

$$P_{\text{отк}}^Z = 1 / \sum_{n=1}^N (1/P_{\text{отк}}^{Zn}). \quad (22)$$

При этом интенсивность выходного потока определяется:

- из подсистемы S :

$$\lambda_{\Sigma}^S = \lambda_{\Sigma}(1 - P_{\text{отк}}^S); \quad (23)$$

- из подсистемы Z :

$$\lambda_{\Sigma}^Z = \lambda_{\Sigma}(1 - P_{\text{отк}}^S)(1 - P_{\text{отк}}^Z). \quad (24)$$

Абсолютные пропускные способности узлов рассчитываются в соответствии с выражениями:

- для подсистемы S :

$$A^S = \lambda_{\Sigma}^S \cdot Q^S; \quad (25)$$

- для подсистемы Z :

$$A^Z = \lambda_\Sigma^Z \cdot Q^Z. \quad (26)$$

Значение показателя стоимости определяется:

– для подсистемы S :

$$C^S = \sum_{j=1}^J k_j^S c_j^S; \quad (27)$$

– для подсистемы Z :

$$C^Z = \sum_{n=1}^N k_n^Z c_n^Z. \quad (28)$$

Таким образом, в соответствии с предложенным описанием системы F в терминах СМО поставленную задачу выбора вариантов построения ИУС с учетом ограничений в формализованном виде можно представить в следующем виде:

$$F(S, Z): v^* = \arg \max_{v \in V} W(K_v^S, K_v^Z, \lambda_\Sigma, \mu^S, \mu^Z) \quad (29)$$

при ограничениях

$$T_{\text{обсл}}^S(K_v^S, \lambda_\Sigma, \mu^S, \mu^Z) \leq T_{\text{зад}}^S; \quad (30)$$

$$T_{\text{обсл}}^Z(K_v^Z, \lambda_\Sigma, \mu^S, \mu^Z) \leq T_{\text{зад}}^Z; \quad (31)$$

$$C^S = \sum_{j=1}^J k_j^S c_j^S \leq C_{\text{доп}}^S; \quad (32)$$

$$C^Z = \sum_{n=1}^N k_n^Z c_n^Z \leq C_{\text{доп}}^Z; \quad (33)$$

$$\rho_j^S = \sum_{i=1}^I \frac{\lambda_i}{k_j^S \mu_{ij}^S} \leq \rho_{\text{доп}}^S, \quad \forall j = \overline{1, J}; \quad (34)$$

$$\rho_n^Z = \sum_{i=1}^I \frac{\lambda_i}{k_n^Z \mu_{in}^Z} \leq \rho_{\text{доп}}^Z, \quad \forall n = \overline{1, N}, \quad (35)$$

где v – номер варианта построения подсистем S и Z ($v = \overline{1, V}$);
 V – общее количество вариантов построения подсистем S и Z .

Целью исследования является определение вектора $K^S = \{k_j^S\}$, $j = \overline{1, J}$, элементы k_j^S которого определяют количество каналов обслуживания узлов j -го типа в подсистеме S и вектора $K^Z = \{k_n^Z\}$, $n = \overline{1, N}$, элементы k_n^Z которого определяют количество каналов обслуживания узлов n -го типа в подсистеме Z , при которых обеспечивается максимальная пропускная способность этих подсистем и обслуживание максимального количества объектов в области D за заданное время $T_{\text{зад}}$.

Данная задача предполагает некоторую процедуру поиска оптимального решения, которая может быть представлена в виде алгоритма выбора состава средств обслуживания в указанных подсистемах S и Z .

4. Алгоритм выбора состава обслуживающих средств в подсистемах S и Z . Алгоритм выбора состава обслуживающих средств в подсистемах S и Z представлен на рисунке 3.

Исходными данными для алгоритма являются:

- суммарный входной поток λ_{Σ} заявок, состоящий из заявок i -го типа и заданный вектором $\lambda_{\Sigma} = \{\lambda_i\}$, $i = \overline{1, I}$ интенсивностей поступления заявок i -го типа;

- матрица $\mu^S = \{\mu_{ij}^S\}$, $i = \overline{1, I}$, $j = \overline{1, J}$, состоящая из элементов μ_{ij}^S интенсивностей обслуживания заявок i -го типа ($i = \overline{1, I}$) одним каналом обслуживания узла j -го типа ($j = \overline{1, J}$) в подсистеме S ;

- матрица $\mu^Z = \{\mu_{in}^Z\}$, $i = \overline{1, I}$, $n = \overline{1, N}$, состоящая из элементов μ_{in}^Z интенсивностей обслуживания заявок i -го типа ($i = \overline{1, I}$) одним каналом обслуживания узла n -го типа ($n = \overline{1, N}$) в подсистеме Z .

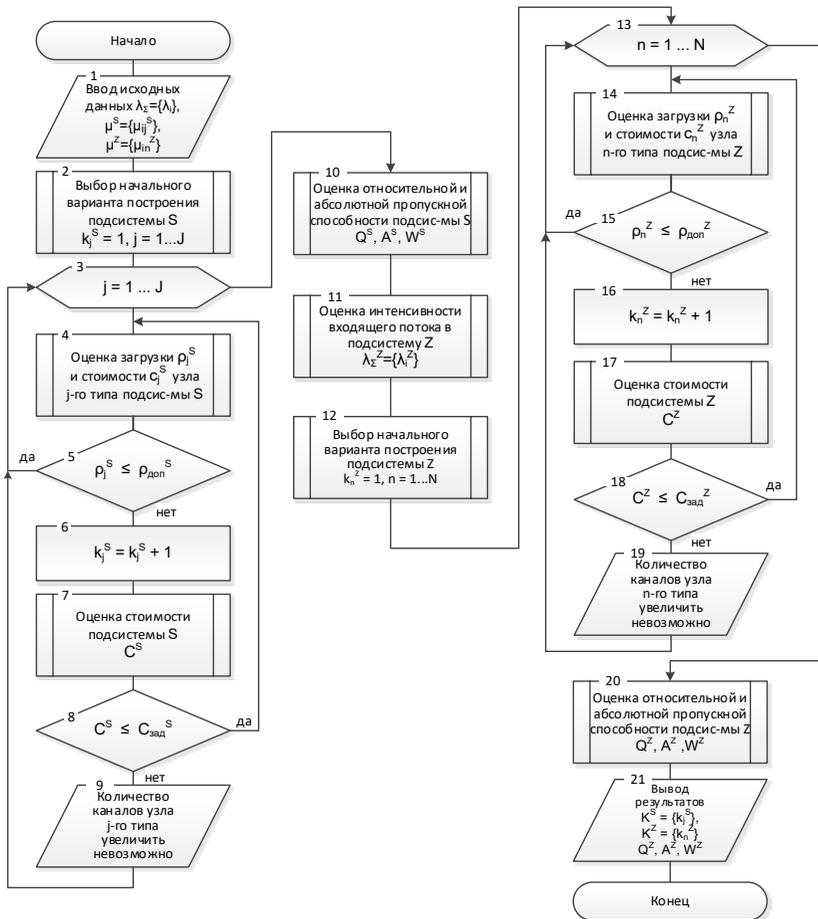


Рис. 3. Алгоритм выбора варианта построения ИУС

Алгоритм включает выполнение следующей последовательности действий:

- ввод исходных данных: $\lambda_{\bar{i}} = \{\lambda_i\}$, $i = \overline{1, I}$; $\mu^S = \{\mu_{ij}^S\}$, $i = \overline{1, I}$, $j = \overline{1, J}$; $\mu^Z = \{\mu_{in}^Z\}$, $i = \overline{1, I}$, $n = \overline{1, N}$ (блок 1);
- выбор начального варианта состава подсистемы S для проведения исследований: $k_j^S = 1$, $j = \overline{1, J}$ (блок 2);
- организация цикла оценки загрузки и стоимости узлов j -го типа в соответствии с выражениями (32), (34) (блоки 3, 4);

- проверка выполнения условия допустимой загрузки узла j -го типа (блок 5), если условие не выполняется, то количество k_j^S каналов узла j -го типа увеличивается на 1, иначе – производится переход к выбору количества каналов узла следующего типа ($j = j+1$) (блоки 3–6);
- при увеличении количества каналов узла j -го типа производится оценка стоимости подсистемы S и проверка условия не превышения допустимых затрат на построение подсистемы S (блоки 7, 8);
- в случае выполнения условия производится переход к оценке загрузки узла j -го типа при увеличении количества каналов (блок 4), иначе – выводится сообщение о невозможности увеличения количества каналов в узле j -го типа (блок 9);
- далее производится оценка загрузки, стоимости и необходимого количества каналов для всех узлов j -го типа ($j = \overline{1, J}$) (блоки 3–9);
- по завершению цикла по типам производится оценка вероятности отказа и относительной (абсолютной) пропускной способности подсистемы S (блок 10).

Далее аналогичным образом производится анализ и выбор количества каналов подсистемы Z (блоки 11-20). По окончании выполнения алгоритма производится вывод полученных результатов (блок 21). Полученный результат является квазиоптимальным или базовым и может быть использован в дальнейшем при более детальном исследовании ИУС.

5. Пример выбора состава обслуживающих устройств ИУС на основе её моделирования в виде сетевой СМО. Рассмотрим процесс выбора состава обслуживающих устройств ИУС, которая представлена в виде двухфазной сетевой СМО, моделирующей два этапа обслуживания заявок, поступающих на вход системы.

Пусть на вход ИУС поступает три типа заявок, характеризующих интенсивностями: $\lambda_1 = 0,1$; $\lambda_2 = 0,3$; $\lambda_3 = 0,4$.

В состав ИУС входят две подсистемы: подсистема S , предназначенная для выполнения первого этапа обслуживания поступивших заявок, и подсистема Z , выполняющая обслуживание на втором этапе. В состав каждой из подсистем S и Z входят по три узла, имеющих однотипные каналы, которые характеризуются матрицей интенсивностей обслуживания заявок $\mu^S = \{\mu_{ij}^S\}$, $i = \overline{1, I}$, $j = \overline{1, J}$ каналами узлов в подсистеме S :

$$\mu^S = \begin{bmatrix} 0,3 & 0,4 & 0,5 \\ 0,5 & 0,6 & 0,6 \\ 0,6 & 0,7 & 0,8 \end{bmatrix}$$

и матрицей интенсивностей обслуживания заявок $\mu^Z = \{\mu_{in}^Z\}$, $i = \overline{1, I}$, $n = \overline{1, N}$ каналами узлов в подсистеме Z :

$$\mu^Z = \begin{bmatrix} 0,2 & 0,3 & 0,4 \\ 0,4 & 0,4 & 0,5 \\ 0,5 & 0,6 & 0,7 \end{bmatrix}.$$

Заданы стоимости одного канала в подсистеме S (в у.е.):

$$c_1^S = 10; \quad c_2^S = 20; \quad c_3^S = 30;$$

и в подсистеме Z :

$$c_1^Z = 50; \quad c_2^Z = 60; \quad c_3^Z = 80,$$

а также допустимые затраты на создание подсистем S и Z :

$$C_{\text{доп}}^S = 200; \quad C_{\text{доп}}^Z = 500.$$

Кроме того, при выборе состава обслуживающих устройств учитывается допустимая загрузка соответствующих узлов подсистем S и Z :

$$\rho_{\text{доп}} = 0,75.$$

Требуется определить количество каналов каждого из узлов в подсистемах S и Z , при которых обеспечивается обслуживание в ИУС поступающих заявок с учетом заданных ограничений.

Решение.

1 шаг. Задание начального варианта количества каналов всех узлов подсистем S и Z :

$$K_1^S = \{1, 1, 1\};$$

$$K_1^Z = \{1, 1, 1\}.$$

2 шаг. Задание $j = 1$. Оценка приведенной загрузки 1-го узла и суммарной стоимости подсистемы S при $k_1^S = 1$:

$$\rho_1^S = \sum_{i=1}^I \frac{\lambda_i}{k_1^S \mu_{i1}^S} = \frac{0,1}{0,3} + \frac{0,3}{0,5} + \frac{0,4}{0,6} = 0,33 + 0,6 + 0,67 = 1,6;$$

$$(\rho_1^S > \rho_{\text{доп}}^S);$$

$$C^S = \sum_{j=1}^J k_j^S c_j = 10 + 20 + 30 = 60;$$

$$(C^S < C_{\text{доп}}^S).$$

3 шаг. Увеличение $k_1^S = k_1^S + 1 = 2$. Оценка приведенной загрузки 1-го узла и суммарной стоимости подсистемы S при $k_1^S = 2$:

$$\rho_1^S = \sum_{i=1}^I \frac{\lambda_i}{k_1^S \mu_{i1}^S} = \frac{0,1}{0,6} + \frac{0,3}{1,0} + \frac{0,4}{1,2} = 0,17 + 0,3 + 0,33 = 0,8;$$

$$(\rho_1^S > \rho_{\text{доп}}^S);$$

$$C^S = \sum_{j=1}^J k_j^S c_j = 20 + 20 + 30 = 70;$$

$$(C^S < C_{\text{доп}}^S).$$

4 шаг. Увеличение $k_1^S = k_1^S + 1 = 3$. Оценка приведенной загрузки 1-го узла и суммарной стоимости подсистемы S при $k_1^S = 3$:

$$\rho_1^S = \sum_{i=1}^I \frac{\lambda_i}{k_1^S \mu_{i1}^S} = \frac{0,1}{0,9} + \frac{0,3}{1,5} + \frac{0,4}{1,8} = 0,11 + 0,2 + 0,22 = 0,53;$$

$$(\rho_1^S < \rho_{\text{доп}}^S);$$

$$C^S = \sum_{j=1}^J k_j^S c_j = 30 + 20 + 30 = 80;$$

$$(C^S < C_{\text{доп}}^S).$$

5 шаг. Задание $j = 2$. Оценка приведенной загрузки 2-го узла и суммарной стоимости подсистемы S при $k_2^S = 1$:

$$\rho_2^S = \sum_{i=1}^I \frac{\lambda_i}{k_2^S \mu_{i2}^S} = \frac{0,1}{0,4} + \frac{0,3}{0,6} + \frac{0,4}{0,7} = 0,25 + 0,5 + 0,57 = 1,32;$$

$$(\rho_2^S > \rho_{\text{доп}}^S);$$

$$C^S = \sum_{j=1}^J k_j^S c_j = 30 + 20 + 30 = 80;$$

$$(C^S < C_{\text{доп}}^S).$$

6 шаг. Увеличение $k_2^S = k_2^S + 1 = 2$. Оценка приведенной загрузки 2-го узла и суммарной стоимости подсистемы S при $k_2^S = 2$:

$$\rho_2^S = \sum_{i=1}^I \frac{\lambda_i}{k_2^S \mu_{i2}^S} = \frac{0,1}{0,4} + \frac{0,3}{1,2} + \frac{0,4}{1,4} = 0,125 + 0,25 + 0,29 = 0,67;$$

$$(\rho_2^S < \rho_{\text{доп}}^S);$$

$$C^S = \sum_{j=1}^J k_j^S c_j = 30 + 40 + 30 = 100;$$

$$(C^S < C_{\text{доп}}^S).$$

7 шаг. Задание $j = 3$. Оценка приведенной загрузки 3-го узла и суммарной стоимости подсистемы S при $k_3^S = 1$:

$$\rho_3^S = \sum_{i=1}^I \frac{\lambda_i}{k_3^S \mu_{i3}^S} = \frac{0,1}{0,5} + \frac{0,3}{0,6} + \frac{0,4}{0,8} = 0,2 + 0,5 + 0,5 = 1,2;$$

$$(\rho_3^S > \rho_{\text{доп}}^S);$$

$$C^S = \sum_{j=1}^J k_j^S c_j = 30 + 40 + 30 = 100;$$

$$(C^S < C_{\text{доп}}^S).$$

8 шаг. Увеличение $k_3^S = k_3^S + 1 = 2$. Оценка приведенной загрузки 3-го узла и суммарной стоимости подсистемы S при $k_3^S = 2$:

$$\rho_3^S = \sum_{i=1}^I \frac{\lambda_i}{k_3^S \mu_{i3}^S} = \frac{0,1}{1,0} + \frac{0,3}{1,2} + \frac{0,4}{1,4} = 0,1 + 0,25 + 0,25 = 0,6;$$

$$(\rho_3^S < \rho_{\text{доп}}^S);$$

$$C^S = \sum_{j=1}^J k_j^S c_j = 30 + 40 + 60 = 130;$$

$$(C^S = C_{\text{доп}}^S).$$

9 шаг. Оценка относительной и абсолютной пропускной способности для полученного базового варианта состава обслуживающих узлов подсистемы S при $K_5^S = \{3, 2, 2\}$:

1) для 1-го узла подсистемы S (при $k_1^S = 3$):

$$P_0^{S1} = 1 / \sum_{r=1}^{k_1^S} \left(1 + \frac{\rho_1^r}{r!} \right) = 1 / \left(1 + 0,53 + \frac{0,28}{2} + \frac{0,15}{6} \right) = 0,588;$$

$$P_{\text{отк}}^{S1} = \frac{\rho_1^{k_1^S}}{k_1^{S1}!} P_0^{S1} = \frac{0,53^3}{6} \cdot 0,588 = 0,015;$$

$$Q_1^S = 1 - P_{\text{отк}}^{S1} = 1 - 0,022 = 0,985;$$

2) для 2-го узла подсистемы S (при $k_2^S = 2$):

$$P_0^{S2} = 1 / \sum_{r=1}^{k_2^S} \left(1 + \frac{\rho_2^r}{r!} \right) = 1 / \left(1 + 0,67 + \frac{0,45}{2} \right) = 0,528 ;$$

$$P_{\text{отк}}^{S2} = \frac{\rho_1^{k_2^S}}{k_2^{S!}} P_0^{S2} = \frac{0,67^2}{2} \cdot 0,528 = 0,116 ;$$

$$Q_2^S = 1 - P_{\text{отк}}^{S2} = 1 - 0,116 = 0,884 ;$$

3) для 3-го узла подсистемы S (при $k_3^S = 2$):

$$P_0^{S3} = 1 / \sum_{r=1}^{k_3^S} \left(1 + \frac{\rho_3^r}{r!} \right) = 1 / \left(1 + 0,6 + \frac{0,36}{2} \right) = 0,561 ;$$

$$P_{\text{отк}}^{S3} = \frac{\rho_1^{k_3^S}}{k_3^{S!}} P_0^{S3} = \frac{0,6^2}{2} \cdot 0,561 = 0,101 ;$$

$$Q_3^S = 1 - P_{\text{отк}}^{S3} = 1 - 0,101 = 0,899 ;$$

4) для подсистемы S (при $K_5^S = \{3, 2, 2\}$):

$$P_{\text{отк}}^S = \frac{P_{\text{отк}}^{S1} \cdot P_{\text{отк}}^{S2} \cdot P_{\text{отк}}^{S3}}{P_{\text{отк}}^{S1} \cdot P_{\text{отк}}^{S2} + P_{\text{отк}}^{S1} \cdot P_{\text{отк}}^{S3} + P_{\text{отк}}^{S2} \cdot P_{\text{отк}}^{S3}} =$$

$$= \frac{0,015 \cdot 0,116 \cdot 0,101}{0,015 \cdot 0,116 + 0,015 \cdot 0,101 + 0,116 \cdot 0,101} = 0,0117 ;$$

$$Q^S = 1 - P_{\text{отк}}^S = 1 - 0,0117 = 0,9883 ;$$

$$A^S = \lambda_{\Sigma} \cdot Q^S = 0,8 \cdot 0,9883 = 0,7906.$$

10 шаг. Оценка интенсивности входящего потока в подсистему Z :

$$\lambda_1^Z = \lambda_1^S \cdot Q^S = 0,1 \cdot 0,9883 = 0,09883 ;$$

$$\lambda_2^Z = \lambda_2^S \cdot Q^S = 0,3 \cdot 0,9883 = 0,29649 ;$$

$$\lambda_3^Z = \lambda_3^S \cdot Q^S = 0,4 \cdot 0,9883 = 0,39532 .$$

11-20 шаги. Оценка характеристик для подсистемы Z (производится аналогичным образом) и вывод полученных результатов.

В результате оценки получены следующие значения характеристик для подсистемы Z :

1) вектор $K^Z = \{k_n^Z\}$, $n = \overline{1, N}$ количества обслуживающих каналов узлов подсистемы Z :

$$K^Z = \{3, 3, 2\};$$

2) значения загрузки обслуживающих каналов узлов подсистемы Z :

$$\rho_1^Z = 0,68; \rho_2^Z = 0,58; \rho_3^Z = 0,71;$$

3) затраты на создание подсистемы Z :

$$C^Z = 490 \text{ у. е.} < C_{\text{доп}}^Z;$$

4) вероятности отказа в обслуживании заявок в узлах подсистемы Z :

$$P_{\text{отк}}^{Z1} = 0,027; P_{\text{отк}}^{Z2} = 0,018; P_{\text{отк}}^{Z3} = 0,128;$$

5) относительная и абсолютная пропускная способность для базового варианта состава обслуживающих узлов подсистемы Z при $K^Z = \{3, 3, 2\}$:

$$P_{\text{отк}}^Z = 0,0099;$$

$$Q^Z = 1 - P_{\text{отк}}^Z = 1 - 0,0099 = 0,9901;$$

$$A^Z = \lambda_{\Sigma}^Z \cdot Q^Z = 0,79 \cdot 0,9901 = 0,7821.$$

На рисунках 4–11 приведены зависимости загрузки, относительной пропускной способности узлов подсистем S и Z , а также показателя эффективности W системы F от её параметров. При этом на рисунке 4 показаны зависимости загрузки узлов сетевых СМО для выбранного количества каналов обслуживания в подсистемах S и Z .

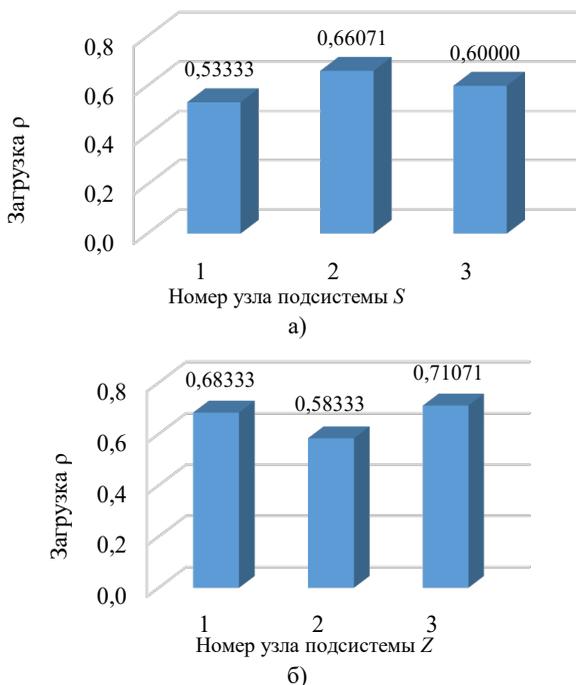
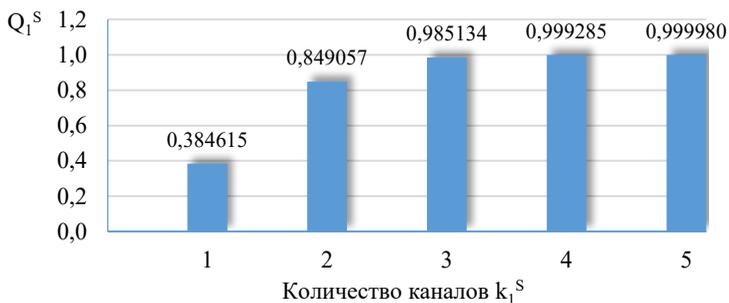


Рис. 4. Оценка загрузки узлов сетевых СМО: а) подсистемы S; б) подсистемы Z

На рисунках 5–7 показаны зависимости относительной пропускной способности узлов сетевой СМО от количества каналов в узлах подсистемы S.

Рис. 5. Зависимость относительной пропускной способности Q_1^S от количества каналов 1-го узла подсистемы S

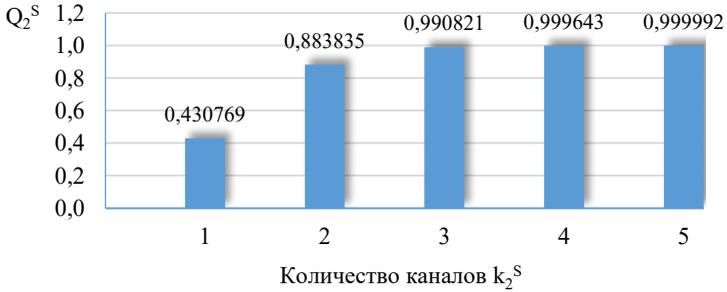


Рис. 6. Зависимость относительной пропускной способности Q_2^S от количества каналов 2-го узла подсистемы S

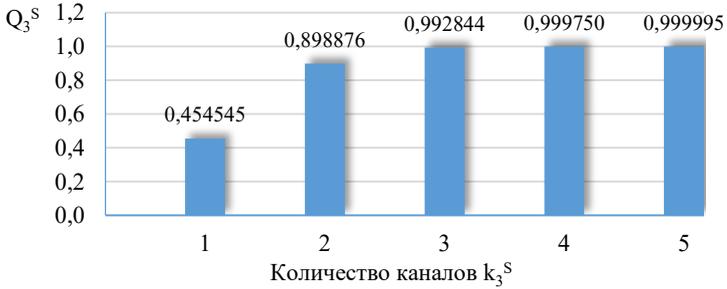


Рис. 7. Зависимость относительной пропускной способности Q_3^S от количества каналов 3-го узла подсистемы S

На рисунках 8–10 показаны зависимости относительной пропускной способности узлов сетевой СМО от количества каналов в узлах подсистемы Z .

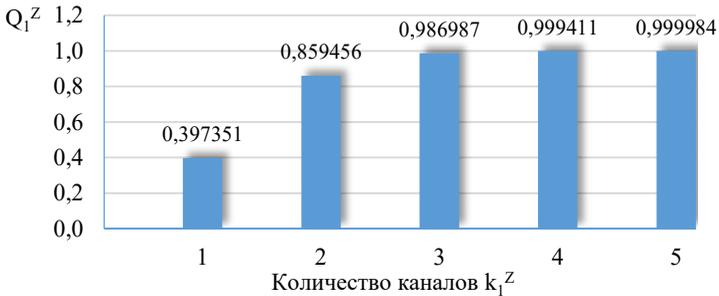


Рис. 8. Зависимость относительной пропускной способности Q_1^Z от количества каналов 1-го узла подсистемы Z

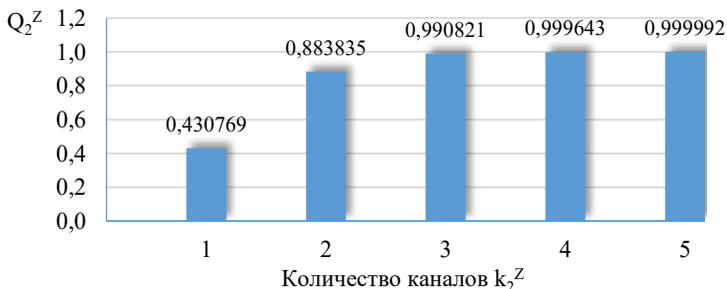


Рис. 9. Зависимость относительной пропускной способности Q_2^Z от количества каналов 2-го узла подсистемы Z

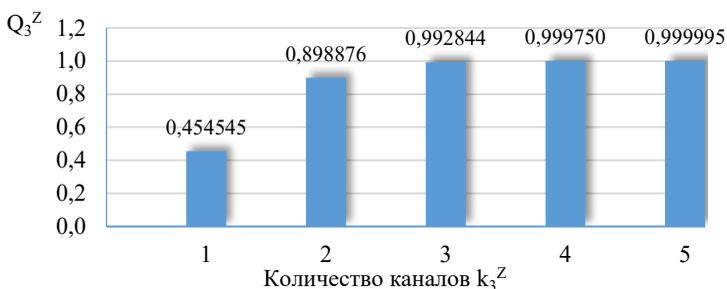


Рис. 10. Зависимость относительной пропускной способности Q_3^Z от количества каналов 3-го узла подсистемы Z

Анализ результатов моделирования показывает, что пропускная способность ИУС зависит от количества каналов в узлах и от их производительности. При этом значительное снижение загрузки происходит при увеличении количества каналов более трех или пяти в зависимости от интенсивности входного потока. Причем при загрузке менее 0,75 целесообразно повышать производительность каналов, а при загрузке более 0,75 целесообразно увеличивать количество каналов. Это объясняется резким возрастанием вероятности отказа в обслуживании заявок при большой загрузке системы. Поэтому при выборе варианта построения системы необходимо учитывать основные показатели эффективности ИУС.

На рисунке 11 показана зависимость комплексного показателя W^* эффективности системы, представляющего собой отношение прироста пропускной способности к стоимости, нормированной по отношению к максимальной стоимости варианта построения ИУС, при увеличении количества каналов в узлах сетевой СМО подсистем S и Z .

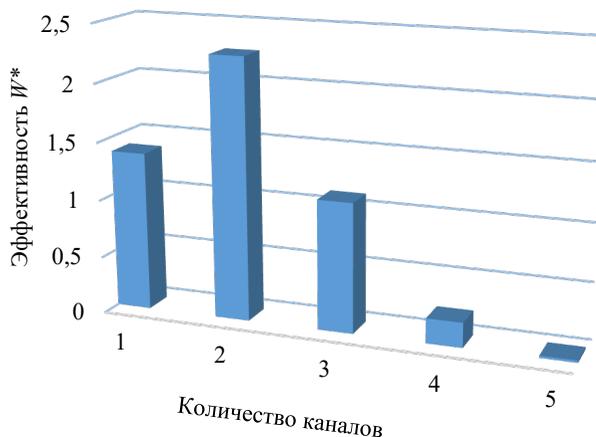


Рис. 11. Зависимость комплексного показателя эффективности от количества каналов в узлах системы

Анализ зависимости, представленной на рисунке 11, показывает, что для приведенного примера наиболее эффективным вариантом построения проектируемой ИУС является наличие в узлах обслуживания не менее 3 каналов обслуживания. Дальнейшее увеличение количества каналов (для приведенного примера – более 5) нецелесообразно, так как рост стоимости значительно превышает прирост пропускной способности системы.

Разработанный методический аппарат и предложенные принципы построения моделей ранее были использованы при выборе количества каналов обслуживания в ИУС с иерархической структурой пунктов управления [11].

Заключение. Предложенные постановка задачи и модель ИУС на основе двухфазной сетевой модели СМО являются дальнейшим совершенствованием научно-методического аппарата исследования сложных технических систем и могут быть использованы на ранних этапах проектирования ИУС. В рамках данной работы приведен практический пример выбора варианта построения ИУС и исследованы зависимости пропускной способности ИУС от количества обслуживающих каналов в узлах ИУС при обслуживании заявок и заданной информационной нагрузке. Установлено, что значительное снижение загрузки происходит при увеличении количества каналов более трех или пяти в зависимости от интенсивности входного потока. При этом увеличение пропускной

способности ИУС возможно либо путем увеличения количества каналов, либо при заданном количестве каналов путем увеличения их производительности. Эти два решения являются неравнозначными, так как, как показали исследования, при определенных условиях целесообразно повышать производительность каналов, а при других условиях целесообразно увеличивать количество каналов. Это объясняется резким возрастанием вероятности отказа в обслуживании заявок при большой загрузке системы. Поэтому при выборе варианта построения системы необходимо учитывать основные показатели эффективности ИУС.

Следующим этапом развития математических моделей подобного класса является использование в ходе исследований приоритетной обработки заявок и объединение отдельных моделей устройств ИУС на основе СМО в сетевые структуры с использованием искусственного интеллекта при формировании модели структуры ИУС.

Литература

1. Ляковский В.Л. Система поддержки принятия решений по созданию (развитию) распределенных информационно-управляющих систем организационного типа // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2017. Т. 9. № 6. С. 61–72.
2. Ляковский В.Л., Бреслер И.Б., Алашеев М.А. Методические и программные средства выбора решений по созданию (развитию) автоматизированных систем управления // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2021. Т. 13. № 3. С. 48–59.
3. Байсеитов М.Н., Ескибаев Е.Т., Избасов А.Г., Мельничук А.И., Юрков Н.К. К проблеме синтеза информационно-управляющей системы сложных технических объектов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2022. № 4(64). С. 57–76.
4. Иванов С.А. Элементы информационной поддержки принятия решений при управлении лесным хозяйством // Актуальные вопросы лесного хозяйства. Материалы V международной молодежной научно-практической конференции. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова, 2021. С. 138–141.
5. Фрейман В.И. К вопросу о проектировании и реализации элементов и устройств распределенных информационно-управляющих систем // Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2019. № 30. С. 28–49.
6. Ашарина И.В., Гришин В.Ю., Сиренко В.Г. Отказоустойчивые системы управления перспективными группировками космических аппаратов как основа построения сетевых систем. Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2023. Т. 194. № 3. С. 17–23.
7. Шумилина Н.А. Информационно-управляющая система для решения управленческих задач проектов промышленных предприятий с учетом риска отказа оборудования // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2018. № 2(46). С. 48–63.

8. Воеводин В.А. Модель оценки функциональной устойчивости элементов информационной инфраструктуры для условий воздействия множества компьютерных атак // Информатика и автоматизация. 2023. Т. 22. № 3. С. 691–715.
9. Козлов В.В., Лагун А.В., Харченко В.А., Коноплев М.Д. Применение иерархической системы оценивания целенаправленных процессов синтеза сложных технических систем // Известия ТулГУ. Технические науки. 2023. № 8. С. 364–374.
10. Мустафаев М.Г. Анализ эффективности функционирования и управления производственной системой предприятия // Автоматизация. Современные технологии. 2018. Т. 72. № 11. С. 499–501.
11. Онуфрей А.Ю., Разумов А.В., Какаев В.В. Метод оптимизации структуры в иерархических распределенных системах управления // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23. № 1. С. 44–53.
12. Кротов К.В. Математическое моделирование процессов выполнения пакетов заданий в конвейерных системах с промежуточными буферами ограниченных размеров // Информатика и автоматизация. 2023. Т. 22. № 6. С. 1415–1450.
13. Клеванский Н.Н., Перетяшко А.В., Леонтьев А.А., Мавзовин В.С., Воронкова И.В. Функциональная модель интегрированной системы управления учебным процессом вуза // Современные наукоемкие технологии. 2023. № 6. С. 48–55.
14. Mayr H.C., Thalheim V. The triptych of conceptual modeling // Software and Systems Modeling. 2021. vol. 20. pp. 7–24.
15. Заяц О.И., Корневская М.М., Ильяшенко А.С., Мулоха В.А. Система массового обслуживания с абсолютным приоритетом, вероятностным выталкивающим механизмом и повторными заявками // Информатика и автоматизация. 2024. Т. 23. № 2. С. 325–351.
16. Choi B.D., Shin Y.W., Ahn W.C. Retrial queues with collision arising from unslotted CMSA/CD protocols // Queueing systems. 1992. vol. 11. pp. 335–356.
17. Кротов К.В. Математическая модель и алгоритм метода ветвей и границ для оптимизации решений по составам пакетов в многостадийных системах // Информатика и автоматизация. 2022. Т. 21. № 1. С. 5–40.
18. Андреев С.Ю., Трегубов Р.Б., Миронов А.Е. Задача выбора пропускных способностей каналов связи транспортной сети, учитывающая разбалансировку трафика различного приоритета // Труды СПИИРАН. 2020. Т. 19. № 2. С. 412–442.
19. Courtois P.J. Decomposability, instabilities, saturation in multiprogramming systems // Communications of the ACM. 1975. vol. 18. no. 7. pp. 371–377.
20. Kuhn P. Analysis of complex queuing networks by decomposition // 8th International Teletraffic Congress. 1976. pp. 236-1.
21. Qu L., Assi C., Shaban K. Network function virtualization scheduling with transmission delay optimization // IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium. 2016. pp. 638–644.
22. Divakaran D.M., Gurusamy M. Towards flexible guarantees in clouds: Adaptive bandwidth allocation and pricing // IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems. 2014. vol. 26. no. 6. pp. 1754–1764.
23. Draxler S., Karl H., Mann Z.A. Jasper: Joint optimization of scaling, placement, and routing of virtual network services // IEEE Transactions on Network and Service Management. 2018. vol. 15. no. 3. pp. 946–960.
24. Luizelli M.C., da Costa Cordeiro W.L., Buriol L.S., Gaspary L.P. A fix-and-optimize approach for efficient and large scale virtual network function placement and chaining // Computer Communications. 2017. vol. 102. pp. 67–77.

25. Андреев А.А., Шабаетв А.И. Модели и методы выявления структуры локальной вычислительной сети при неполных данных // Информатика и автоматизация. 2021. Т. 20. № 1. С. 160–180.
26. Hussain T.H., Habib S.J. Capacity planning of network redesign – A case study. Proceedings of the International Symposium on Performance Evaluation of Computer and Telecommunication Systems (SPECTS'10). 2010. pp. 52–57.
27. Zhu Z. et al. Data flow monitoring and control of LAN based on strategy. International Conference on Networking and Digital Society. 2010. vol. 2. pp. 225–228.
28. Sivakumar L, Balabaskaran J., Thulasiraman K., Arumugam S. Virtual topologies for abstraction service for IP-VPNs. 17th International Telecommunications Network Strategy and Planning Symposium (Networks). 2016. pp. 213–220.
29. Wang C., Huang N., Bai Y., Zhang S. A method of network topology optimization design considering application process characteristic. Modern Physics Letters B. 2018. vol. 32. no. 07. DOI: 10.1142/S0217984918500914.
30. Zhou S., Cui L., Fang C., Chai S. Research on Network Topology Discovery Algorithm for Internet of Things Based on Multi-Protocol. 10th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC). 2018. pp. 1–6. DOI: 10.1109/ICMIC.2018.8529955.
31. Пименов В.И., Пименов И.В. Анализ и визуализация данных в задачах многокритериальной оптимизации проектных решений. Информатика и автоматизация. 2022. Т. 21. № 3. С. 543–571.
32. Плескунов М.А. Теория массового обслуживания: Учебное пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2022. 264 с.

Куракин Сергей Зосимович — канд. техн. наук, доцент, старший научный сотрудник, военный институт (научно-исследовательский), Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского. Область научных интересов: теория сетевых систем массового обслуживания, численное моделирование, системный анализ, методология разработки программного обеспечения, компьютерные науки. Число научных публикаций — 125. vka@mil.ru; улица Ждановская, 13, 197198, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(812)237-1249.

Онуфрей Андрей Юрьевич — д-р техн. наук, профессор, работник науки и техники РФ, ведущий научный сотрудник, военный институт (научно-исследовательский), Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского. Область научных интересов: прикладные задачи теории случайных процессов и теории вероятностей, методы системного анализа и построения сложных технических систем специального назначения, теория массового обслуживания. Число научных публикаций — 152. vka@mil.ru; улица Ждановская, 13, 197198, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(812)237-1249.

Разумов Александр Владимирович — д-р техн. наук, профессор, работник науки и техники РФ, старший научный сотрудник, военный институт (научно-исследовательский), Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского. Область научных интересов: прикладные задачи построения сложных технических систем специального назначения, методы системного анализа и теории массового обслуживания. Число научных публикаций — 133. vka@mil.ru; улица Ждановская, 13, 197198, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(812)237-1249.

S. KURAKIN, A. ONUFREY, A. RAZUMOV
**RESEARCH OF OPTIONS FOR CONSTRUCTING INFORMATION
MANAGEMENT SYSTEMS BASED ON NETWORK MODELS OF
QUEUING SYSTEMS**

Kurakin S., Onufrey A., Razumov A. Research of Options for Constructing Information Management Systems Based on Network Models of Queuing Systems.

Abstract. The use of information management systems (IMSs) for the management of technical facilities is currently one of the directions for further improvement and increase in the effectiveness of the use of technical facilities in solving their target tasks. The existing modern IMSs are a set of hardware and software tools designed for collecting, processing and storing information and management. In the presence of a large amount of information and timely contradictory factors affecting the quality of management, making informed and timely decisions in the management process is impossible without the use of IMSs. The IMSs currently being developed are, for the most part, specialized systems and are designed to solve specific tasks. In this regard, the development and design of IMSs should be carried out taking into account the relationship with the target indicators and features of the management facilities, the results of a comprehensive analysis of information about the IMS elements in the process of functioning, and structural and algorithmic parameters that affect performance indicators. The use of mathematical models for the study of options for the construction of an IMS is the basis for the design and development of devices and subsystems of an IMS. The IMS models currently being developed make it possible to conduct research for single-stage management processes with the presence of similar service facilities in the system. At the same time, modern technical facilities and control systems are complex complexes with cyclically repeating control processes of various types of means. As a rule, such complexes have a set of parallel operating devices (control channels) that provide control of different types of objects at various stages of information processing. In this case, the structure of the IMS must be represented as a multiphase multichannel technical system in which the process of simultaneous management of several objects of various types takes place. In this regard, the purpose of the article is to develop a mathematical model of an IMS with two phases of management and the presence of an arbitrary number of serviced different types of management facilities. The basis of the model is a multiphase CFR network model with a limited waiting time for an application in the service queue. The study on the model allows choosing an option for building an IMS, in particular, choosing the optimal number of control channels for various types of objects according to the criterion of optimality and restrictions on the cost and time of management. An algorithm for selecting an option for building an IMS has been developed, and an example of calculating the number of control channels for managing three types of objects is given.

Keywords: information management system, model, mathematical modeling, network multichannel queuing system, choice of construction option, optimality criteria.

References

1. Lyaskovskij V.L. [Decision support system for the creation (development) of distributed information and control systems of an organizational type]. *Naukoemkie tekhnologii v kosmicheskikh issledovaniyah Zemli – High-tech in space exploration of the Earth*. 2017. vol. 9. no. 6. pp. 61–72. (In Russ.).
2. Lyaskovskij V.L., Bresler I.B., Alashev M.A. [Methodological and software tools for selecting solutions for the creation (development) of automated control systems].

- Naukoemkie tehnologii v kosmicheskikh issledovaniyah Zemli – High-tech in space exploration of the Earth. 2021. vol. 13. no. 3. pp. 48–59. (In Russ.).
3. Bajseitov M.N., Eskibaev E.T., Izbasov A.G., Mel'nichuk A.I., Yurkov N.K. [On the problem of synthesis of information and control system of complex technical objects]. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Povolzhskij region. Tekhnicheskie nauki – News of higher educational institutions. Volga region.*
 4. Ivanov S.A. *Elementy informacionnoj podderzhki prinyatiya reshenij pri upravlenii lesnym hozyajstvom* [Elements of information support for decision-making in forestry management]. *Aktual'nye voprosy lesnogo hozyajstva. Materialy V mezhdunarodnoj molodezhnoj nauchno-prakticheskoj konferencii* [Topical issues of forestry. Materials of the V International Youth scientific and practical conference]. St. Petersburg: St. Petersburg State Forestry Engineering University named after S.M. Kirov, 2021. pp. 138–141. (In Russ.).
 5. Frejman V.I. [On the issue of design and implementation of elements and devices of distributed information and control systems]. *Vestnik PNIPU. Elektrotehnika, informacionnye tehnologii, sistemy upravleniya – PNIPU Bulletin. Electrical Engineering, Information Technology, Control Systems.* 2019. no. 30. pp. 28–49. (In Russ.).
 6. Asharina I.V., Grishin V.Yu., Sirenko V.G. [Fault-tolerant control systems for promising spacecraft constellations as a basis for constructing network-centric systems]. *Voprosy elektromekhaniki. Trudy VNIIEМ – Questions of Electromechanics. Proceedings of VNIIEМ.* 2023. vol. 194. no. 3. pp. 17–23. (In Russ.).
 7. Shumilina N.A. [Information and management system for solving management problems of industrial enterprise projects taking into account the risk of equipment failure]. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Povolzhskij region. Tekhnicheskie nauki – News of higher educational institutions. Volga region. Technical sciences.* 2018. no. 2(46). pp. 48–63. (In Russ.).
 8. Voevodin V.A. [A model for assessing the functional stability of information infrastructure elements for conditions of exposure to multiple computer attacks]. *Informatika i avtomatizaciya – Informatics and Automation.* 2023. vol. 22. no. 3. pp. 691–715. (In Russ.).
 9. Kozlov V.V., Lagun A.V., Harchenko V.A., Konoplev M.D. [Application of a hierarchical system for evaluating targeted processes of synthesis of complex technical systems]. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki – Tula State University News. Technical Sciences.* 2023. no. 8. pp. 364–374. (In Russ.).
 10. Mustafaeв M.G. [Analysis of the efficiency of functioning and management of the enterprise production system] *Avtomatizaciya. Sovremennye tehnologii – Automation. Modern technologies.* 2018. vol. 72. no. 11. pp. 499–501. (In Russ.).
 11. Onufrej A.Yu., Razumov A.V., Kakaev V.V. [Method of structure optimization in hierarchical distributed control systems]. *Nauchno-tehnicheskij vestnik informacionnyh tehnologij, mekhaniki i optiki – Scientific and technical journal of information technologies, mechanics and optics.* 2023. vol. 23. no. 1. pp. 44–53. (In Russ.).
 12. Krotov K.V. [Mathematical modeling of the processes of completing task packages in conveyor systems with intermediate buffers of limited size]. *Informatika i avtomatizaciya – Informatics and Automation.* 2023. vol. 22. no. 6. pp. 1415–1450. (In Russ.).
 13. Klevanskij N.N., Peretyat'ko A.V., Leont'ev A.A., Mavzovin V.S., Voronkova I.V. [Functional model of the integrated system of management of the educational process of the university]. *Sovremennye naukoemkie tehnologii – Modern high-tech technologies.* 2023. no. 6. pp. 48–55. (In Russ.).

14. Mayr H.C., Thalheim B. The triptych of conceptual modeling. *Software and Systems Modeling*. 2021. vol. 20. pp. 7–24.
15. Zayac O.I., Korenevskaya M.M., Il'yashenko A.S., Mulyuha V.A. [Queuing system with absolute priority, probabilistic ejection mechanism and repeated]. *Informatika i avtomatizatsiya – Informatics and Automation*. 2024. vol. 23. no. 2. pp. 325–351. (In Russ.).
16. Choi B.D., Shin Y.W., Ahn W.C. Retrial queues with collision arising from unslotted CMA/CD protocols. *Queueing systems*. 1992. vol. 11. pp. 335–356.
17. Krotov K.V. A mathematical model and algorithm of the branch and boundary method for optimizing package composition solutions in multistage systems. *Informatika i avtomatizatsiya – Informatics and Automation*. 2022. vol. 21. no. 1. pp. 5–40. (In Russ.).
18. Andreev S.Yu., Tregubov R.B., Mironov A.E. [The task of selecting the bandwidth of communication channels of the transport network, taking into account the imbalance of traffic of different priorities]. *Trudy SPIIRAN – Proceedings of SPIIRAN 2020*. vol. 19. no. 2. pp. 412–442. (In Russ.).
19. Courtois P.J. Decomposability, instabilities, saturation in multiprogramming systems. *Communications of the ACM*. 1975. vol. 18. no. 7. pp. 371–377.
20. Kuhn P. Analysis of complex queuing networks by decomposition. 8th International Teletraffic Congress. 1976. pp. 236-1.
21. Qu L., Assi C., Shaban K. Network function virtualization scheduling with transmission delay optimization. *IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium*. 2016. pp. 638–644.
22. Divakaran D.M., Gurusamy M. Towards flexible guarantees in clouds: Adaptive bandwidth allocation and pricing. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*. 2014. vol. 26. no. 6. pp. 1754–1764.
23. Draxler S., Karl H., Mann Z.A. Jasper: Joint optimization of scaling, placement, and routing of virtual network services. *IEEE Transactions on Network and Service Management*. 2018. vol. 15. no. 3. pp. 946–960.
24. Luizelli M.C., da Costa Cordeiro W.L., Buriol L.S., Gaspari L.P. A fix-and-optimize approach for efficient and large scale virtual network function placement and chaining. *Computer Communications*. 2017. vol. 102. pp. 67–77.
25. Andreev A., Shabaev A. [Models and Methods for Discovery of Local Area Network Topology with Incomplete Data]. *Informatika i avtomatizatsiya – Informatics and Automation*. 2021. vol. 20(1). pp. 160–180. (In Russ.).
26. Hussain T.H., Habib S.J. Capacity planning of network redesign – A case study. *Proceedings of the International Symposium on Performance Evaluation of Computer and Telecommunication Systems (SPECTS'10)*. 2010. pp. 52–57.
27. Zhu Z. et al. Data flow monitoring and control of LAN based on strategy. *International Conference on Networking and Digital Society*. 2010. vol. 2. pp. 225–228.
28. Sivakumar L, Balabaskaran J., Thulasiraman K., Arumugam S. Virtual topologies for abstraction service for IP-VPNs. *17th International Telecommunications Network Strategy and Planning Symposium (Networks)*. 2016. pp. 213–220.
29. Wang C., Huang N., Bai Y., Zhang S. A method of network topology optimization design considering application process characteristic. *Modern Physics Letters B*. 2018. vol. 32. no. 07. DOI: 10.1142/S0217984918500914.
30. Zhou S., Cui L., Fang C., Chai S. Research on Network Topology Discovery Algorithm for Internet of Things Based on Multi-Protocol. *10th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC)*. 2018. pp. 1–6. DOI: 10.1109/ICMIC.2018.8529955.

31. Pimenov V., Pimenov I. [Data Analysis and Visualization in the Tasks of the Project Solutions Multicriteria Optimization]. *Informatika i avtomatizaciya – Informatics and Automation*. 2022. vol. 21(3). pp. 543–571. (In Russ.).
32. Pleskunov M.A. *Teoriya massovogo obsluzhivaniya: Uchebnoe posobie [Queuing Theory: A textbook.]*. Ekaterinburg: Izd-vo Ural. un-ta, 2022. 264 p. (In Russ.).

Kurakin Sergey — Ph.D., Associate Professor, Senior researcher, Military institute (scientific research), The Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky. Research interests: theory of network queuing systems, numerical modeling, software development methodologies, computer science. The number of publications — 125. vka@mil.ru; 13, Zhdanovskaya St., 197198, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(812)237-1249.

Onufrey Andrey — Ph.D., Dr.Sci., Professor, Leading researcher, Military institute (scientific research), The Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky. Research interests: applied problems of the theory of random processes and probability theory, methods of system analysis and construction of complex technical systems for special purposes, queuing theory. The number of publications — 152. vka@mil.ru; 13, Zhdanovskaya St., 197198, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(812)237-1249.

Razumov Alexander — Ph.D., Dr.Sci., Professor, Senior researcher, Military institute (scientific research), The Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky. Research interests: applied problems of building complex technical systems for special purposes, methods of system analysis and queuing theory. The number of publications — 133. vka@mil.ru; 13, Zhdanovskaya St., 197198, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(812)237-1249.