

УДК: 623.355/359

DOI: 10.53816/23061456_2022_1-2_50

**МЕТОДИКА СИНТЕЗА СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ СНАБЖЕНИЯ
ТЕХНИКОЙ СВЯЗИ И АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ**

**THE METHODOLOGY OF SYNTHESIS OF THE STRUCTURE
OF THE SUPPLY SYSTEM OF THE COMMUNICATION EQUIPMENT
AND THE AUTOMATED CONTROL SYSTEM**

А.А. Крачков, д-р техн. наук С.С. Семёнов

A.A. Krachkov, D.Sc. S.S. Semenov

Военная академия связи им. С.М. Буденного

В статье рассмотрены подходы и обозначены проблемы синтеза сложных логистических систем, описаны ключевые свойства и критерии оценки эффективности их функционирования и на основе этого предложена методика синтеза структуры распределенной системы снабжения войск техникой связи (ТС) в локальных войнах и вооруженных конфликтах. Предложенная методика позволяет с достаточной точностью определить адекватный в заданных условиях для определенного контингента войск вариант расположения на местности складов средств связи. Достижение оптимальности построения системы в рассчитанном варианте исполнения возможно за счет применения различных приемов и методов — теории массового обслуживания, теории управления запасами, кластерного анализа, математического программирования. Представлен алгоритм, который при программной реализации возможно использовать в работе должностных лиц, ответственных за техническое обеспечение связи.

Ключевые слова: техническое обслуживание, снабжение, ремонт, техника связи и автоматизированных систем управления, методика, функционирование.

The article considers the approaches and identifies the problems of synthesis of complex logistics systems, describes the key properties and criteria for evaluating the effectiveness of their functioning, and based on this, a method for synthesizing the structure of a distributed system for supplying troops with communications equipment (CE) in local wars and armed conflicts is proposed. The proposed method makes it possible to determine with sufficient accuracy an adequate variant of the location of communication equipment warehouses on the ground under given conditions for a certain contingent of troops. Achieving the optimal design of the system in the calculated version is possible through the use of various techniques and methods — the theory of queuing, the theory of inventory management, cluster analysis, mathematical programming. The algorithm is presented, which, when implemented programmatically, can be used in the work of officials responsible for technical support of communications.

Keywords: maintenance, supply, repair, communication equipment and automated control systems, methodology, operation.

Необходимостью изучения сущности процессов обеспечения (снабжения) войск и возможностью управления ими военные теоретики озадачились в связи с формированием регулярных армий. С развитием военного дела перечень имущества, необходимого для ведения вооруженной борьбы, расширился, в него вошли не только личное оружие, боеприпасы и различные материальные средства, но и разнообразная техника, военно-техническое имущество (ВТИ). На современном этапе развития взглядов на мероприятия снабжения войск применение новых технологий для реализации принципов и подходов, используемых при решении задач обеспечения, стало важнейшим направлением работы военно-научных кадров. Особое внимание при этом уделяется повышению эффективности обеспечения группировок войск в различных условиях.

Рассматриваемые системы представляют собой сложные, иерархические, многофункциональные, многономенклатурные механизмы, характеризующиеся комплексным взаимодействием элементов, рассредоточенных на значительной территории, и требуют для своего создания и развития существенных затрат ресурсов и времени [1, 2]. Основной проблемой при этом является выбор их структуры, которая определяет состав элементов с соответствующими взаимосвязями, с учетом динамики их функционирования. В процессе исследования подобных распределенных логистических систем стало очевидно, что по разным аспектам внутреннего строения можно выделить следующие виды структуры: организационную, топологическую (пространственную), функциональную, информационную и т.д.

Аналогичные информационно-управляющие системы, типа терминальных систем грузовых автоперевозок, систем спутниковой связи, различных автоматизированных средств управления (АСУ) оперативных городских служб обладают рядом характерных особенностей, которые перечислены далее.

Распределенность — свойство, заключающееся в расположении систем на значительных территориях, от локального до глобального масштабов, которые могут включать в себя большое число управляемых (объектов управления) и управляющих элементов. Следует отметить, что такое разделение элементов системы в ряде случаев достаточно условно, так как в современ-

ных распределенных системах элементы, являющиеся объектами управления, зачастую выполняют задачи, относящиеся к функциям управления.

Подвижность (мобильность) — свойство, заключающееся в том, что элементы системы могут быть движущимися или неподвижными, движение элементов осуществляется постоянно или периодически по детерминированным или стохастическим траекториям.

Оперативность — своевременность (скорость) выполнения возложенных на систему функций.

Управляемость — необходимость в оперативной выработке управляющих воздействий, обусловленной перечисленными особенностями распределенных систем, определяет высокие требования к быстродействию выполнения функций элементами и всей системой в целом.

Полнота (комплексность) обслуживания — способность системы выполнить все возникающие задачи по своему предназначению (свои функции), а в случае невозможности выполнения поступившей заявки предусматривается постановка ее в очередь с последующим обслуживанием.

Живучесть — свойство, характеризующее способность системы выполнять свои функции в условиях внешних воздействий. Это определяет необходимость предусмотрения при синтезе структуры специальных мероприятий, направленных на повышение живучести системы.

Адекватность — соответствие затрат (экономических, временных и др.) на проектирование, синтез, обеспечение функционирования требуемым в заданных условиях и при данной постановке задачи.

Автономность — возможность функционирования системы в течении длительного времени без поступления дополнительных ресурсов (информационных, материальных и т.д.).

Задачи синтеза структуры тесно взаимосвязаны с задачами оптимизации функционирования системы. Характер взаимодействия между подсистемами и распределение функций между ними во многом определяются принятыми принципами и алгоритмами управления, степенью централизации при выработке управляющих воздействий и при их осуществлении. Оптимизация сложных иерархических логистических систем, в первую очередь, осуществляется за счет выбо-

ра состава узлов, числа уровней, распределения в пространстве — топологии, определения оптимального числа, расположения и вариантов построения элементов системы, выбор варианта реализации задач управления, мероприятий по обеспечению требуемой живучести. Для успешного совершенствования системы снабжения требуется исследовать, прогнозировать и учитывать динамику материальных потоков через узлы, определить варианты применения различных видов транспорта, внедрение новых технологий.

Основными характеристиками качества синтезируемых вариантов структуры являются: стоимость разработки и эксплуатации системы; временные характеристики выполнения задач; загрузка узлов; уровень обеспеченности техникой и т.д. В простейшем случае в зависимости от типа характеристик, используемых в качестве критерия и ограничений, рассматриваемая задача выбора структуры системы, является линейной, либо нелинейной задачей целочисленного программирования. Нелинейные характеристики, например, быстродействие системы в ряде случаев, могут быть сведены к линейному виду введением дополнительных переменных и ограничений, что позволяет применять для решения рассматриваемых задач стандартные методы линейного целочисленного программирования. Если же размерность задачи велика, приходится разрабатывать специальные методы решения, использующие, например, в своей основе метод «ветвей и границ» [3].

Случай, когда параметры синтезируемых систем известны лишь приближенно, с некоторым распределением вероятностей их значений или с некоторой степенью принадлежности значений параметров заданным интервалам, приводит к неоднозначности определения оптимального варианта структуры системы. В зависимости от степени информированности и неопределенности на этапе синтеза структуры, а также от целей и величины допустимого риска при выборе синтезируемого варианта возможны различные постановки задач синтеза. С математической точки зрения рассматриваемые постановки приводят к задачам стохастического программирования систем с динамическими характеристиками, имитационного моделирования [4, 5].

Методика синтеза структуры системы снабжения заключается в размещении совокупности

грузообрабатывающих терминалов на дорожной сети региона и распределение получателей по зонам обслуживания с предварительным определением оптимального количества терминалов. Задачей синтеза является повышение оперативности снабжения воинских формирований ТС, ВТИ за счет определения количества и размещения по территории минимального по затратам на создание и функционирование терминалов, способных поддерживать требуемый уровень обеспеченности работоспособной техникой при выполнении условий экономической реализуемости системы. Формализовано задача представлена выражением:

$$Q(t_d) \xrightarrow[\substack{K_{\text{тн}} \geq K_{\text{тн, треб}} \\ E \leq E_{\text{дон}}}]{} \max \begin{cases} T(x_r, y_r) \subseteq S_{\text{со}} \\ V_3 \geq V_{\text{мин}} \end{cases},$$

где $Q(t_d)$ — оперативность снабжения ТС/ЗИП; $T(x_r, y_r)$ — топология системы снабжения; $S_{\text{со}}$ — территория проведения; V_3 — объем запасов в системе; E — экономические затраты.

Состав и местоположение исполнительных элементов системы снабжения с учетом затрат на организацию, доступность и глобальность предлагается определять в ходе последовательного выполнения следующих этапов:

- экономическая оценка и выбор необходимого количества терминалов обслуживания (складов средств связи) для заданных потребителей;
- нахождение допустимого решения первого приближения — оптимальной топологической структуры, характеризующейся минимизацией расстояний от терминалов обслуживания до конечных потребителей методом k -средних [6, 7, 8];
- расчет потоковой структуры региональной транспортной сети для заданных потребителей и терминалов обслуживания [9];
- улучшение первого приближения — перераспределение терминалов обслуживания с учетом потоковой структуры региональной транспортной сети, получение оптимального решения;
- постановка экспериментов, анализ полученных результатов и корректировка решения.

На первом этапе в соответствии с положениями теории массового обслуживания, определяется нижняя граница искомой величины. Важным параметром складов и баз материально-тех-

нического обеспечения является коэффициент загрузки, который рассчитывается по формуле:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\vartheta}, \quad (1)$$

где α — коэффициент загрузки; λ — интенсивность поступления требований в систему; ϑ — интенсивность обслуживания одного требования одним обслуживающим устройством (терминалом/складом).

$$\vartheta = \frac{1}{T_{\text{обс}}}, \quad (2)$$

где $T_{\text{обс}}$ — среднее время обслуживания одного требования одним обслуживающим устройством.

Из выражений (1) и (2) следует:

$$\alpha = \lambda T_{\text{обс}}.$$

Учитывая, что λ — интенсивность поступления требований в систему в единицу времени, произведение $\lambda T_{\text{обс}}$ показывает количество требований, поступающих в систему за время обслуживания одного требования одним устройством.

Количество обслуживающих устройств должно быть не менее коэффициента загрузки:

$$n \geq \alpha = \lambda T_{\text{обс}} = \frac{\lambda}{\vartheta}.$$

В противном случае число поступающих требований будет больше суммарной интенсивности работы всех обслуживающих устройств, и очередь будет бесконечно расти [10].

Далее, в соответствии с теорией управления запасами, проводится количественная оценка влияния различных групп факторов на уровень запасов в системе на основе так называемых затрат и штрафов [11]. К факторам первой группы относятся дискретность поставок при непрерывном (или близком к непрерывному) потреблении, а также случайные колебания в спросе на предметы снабжения между поставками, в объеме поставок и в длительности интервала между поставками. Все это определяет тенденцию к увеличению запасов. К факторам второй группы относятся плата за физическое

хранение запасов; упущенный доход в результате «омертвления» средств; естественные потери запаса (ухудшение потребительских свойств вследствие необратимых процессов в хранимом имуществе); моральный износ хранимого имущества. Уровень запасов в системе будет нормирован количеством складов при условии их идентичности.

Под затратами понимается суммарная стоимость на приобретение, содержание и перемещение запасов в системе. Этот оценочный показатель системы снабжения различных воинских формирований будет складываться непосредственно из стоимости помещения, возводимого под складские нужды, оборудования (стеллажей, АРМ, систем жизнеобеспечения) и самих монтажных и пусконаладочных работ. Отсутствие запасов при наличии на них спроса потребителей приводит к простоям и возникновению убытков — штрафов. Применительно к условиям решения задач технического обеспечения штраф может быть обусловлен, например, снижением уровня обеспеченности войск ТС и АСУ или её простоями из-за возникновения отказов и повреждений, которые невозможно устранить в силу отсутствия запасных деталей, узлов, блоков и т.п. Если выразить затраты и штрафы в одних единицах измерения, то общая идея оптимизации уровня запасов может быть пояснена графиком.

На рис. 1 представлена зависимость затрат на приобретение, содержание и перемещение запасов и штрафов от объема запасов. Решение задачи, нахождения необходимого количества складов, находится в точке пересечения графиков функций. Результат первого этапа методики является основой для второго — кластеризации.

Существующие алгоритмы кластеризации декомпозируют набор данных, состоящий из определенного количества наблюдений, на некоторое количество групп (кластеров) с заранее неизвестными параметрами. При этом выполняется поиск центроидов — максимально удаленных друг от друга центров сгущений точек с минимальным разбросом внутри каждого кластера. Наиболее популярный неиерархический алгоритм — метод k -средних Мак-Кина, в котором необходимо задать искомое число конечных кластеров, обозначаемое как « k ». Первоначальное расположение центров кластеров

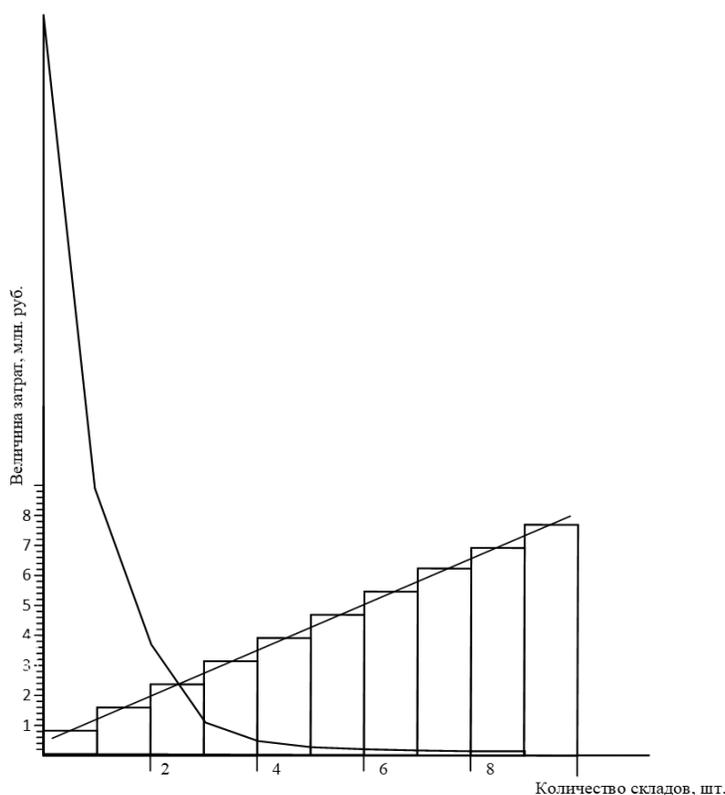


Рис. 1. Зависимость величины штрафов и затрат от уровня запасов в системе

y_i задается произвольно. Задача группировки множества объектов на подмножества (кластеры) решается таким образом, чтобы объекты (в данном случае — потребители) из одного кластера были более похожи друг на друга, чем на объекты из других кластеров, в данном случае по критерию минимизации расстояния. Главным преимуществом метода является возможность обрабатывать очень большие массивы, поскольку нет необходимости хранить в памяти компьютера всю матрицу расстояний целиком. Исходными данными для алгоритма являются координаты местоположения аппаратных на местности μ_k и количество терминалов обслуживания, полученные на предыдущем этапе. Алгоритм (рис. 2) минимизирует суммарное квадратичное отклонение точек кластеров от их центров [8]:

$$\rho(y_i, \mu_k) = \sqrt{\sum_{i=1}^d (y_i - \mu_k)^2}.$$

После инициализации происходит итеративное вычисление расстояния между векторами и центрами кластеров. Векторы разбиваются на

кластеры в соответствии с тем, какой из новых центров оказался ближе по выбранной метрике. Алгоритм завершается, когда на какой-то итерации не происходит изменения внутрикластерного расстояния. Это происходит за конечное число итераций, так как количество возможных разбиений конечного множества конечно, а на каждом шаге суммарное квадратичное отклонение уменьшается, поэтому заикливание невозможно. Работа алгоритма позволяет сформировать топологическую структуру системы с привязкой к местности. Необходимо понимать, что в проведенных с помощью алгоритма кластеризации процедурах не могут быть учтены другие значимые параметры системы снабжения.

Входящий поток заявок в исследуемой системе массового обслуживания (СМО) формируется аппаратными связями в случае возникновения отказа. Выход из строя может произойти как по причине внешнего воздействия противника, так и под влиянием неблагоприятного сочетания других факторов, таких как неправильная эксплуатация экипажем, износ элементов, активное использование или жесткие климатические условия. Интенсивность эксплуатационных отказов

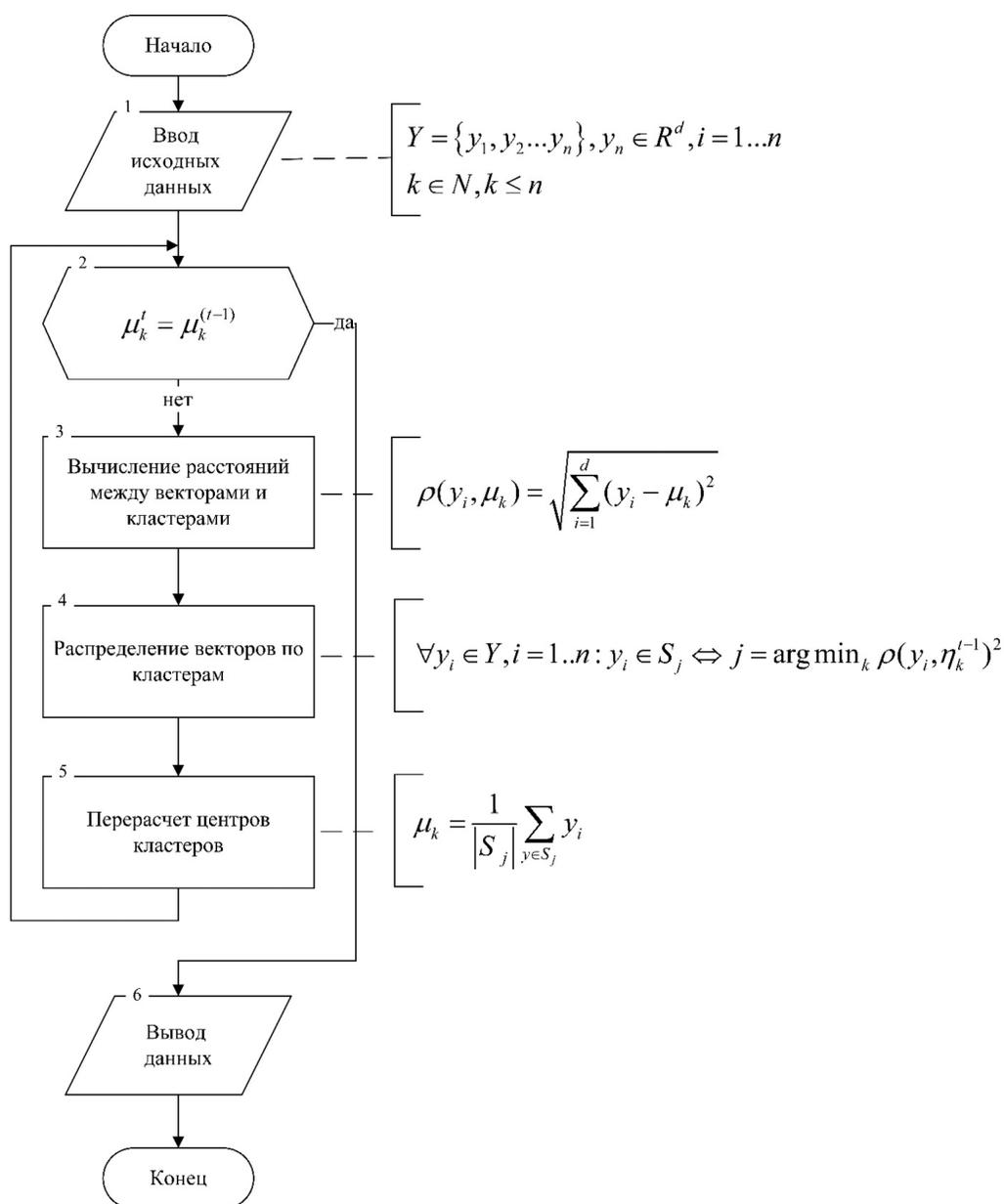


Рис. 2. Алгоритм кластеризации

является стохастической величиной и отличается у разных типов техники связи, а значит, если от одного потребителя поступает значительно большее количество требований на обслуживание, то целесообразно расположить склад с необходимыми запасными частями или аналогичным оборудованием ближе к этой аппаратной. Также не стоит упускать из внимания тот факт, что некоторые изделия связи выделяются в личное пользование должностным лицам. Важность бесперебойной работы таких средств возрастает, а невозможность оперативно восстановить ра-

ботоспособность или заменить на аналогичное влечет за собой большие риски.

Рассуждения приводят к выводу о том, что интенсивность и значимость материального потока между складом и конкретной аппаратной имеют большое влияние на вопросы размещения складов, задача оптимизации принимает многокритериальный вид. В ходе третьего этапа методики предлагается провести уточнение местоположения складов с учетом потоковой структуры логистической сети.

Исходными данными является матрица, характеризующая топологию системы. В основу

положена методика синтеза потоковой структуры [9]. Нахождение множества путей допустимого ранга проводится в соответствии с алгоритмом перечисления (рис. 3).

Представленный алгоритм основан на методе разложения функции по переменным. Метод позволяет задать исходный граф сети в виде совокупности с матричной формой записи функции. При перечислении путей на сети это дает возможность производить простые операции, что приводит к существенному сокращению времени при перечислениях на сети реальной размерности минимальных путей, ранг которых не превышает заданной величины. Данный алгоритм применяется ровно m раз для определения путей допустимого ранга между всеми узлами, которые для удобства целесообразно записать в виде матрицы.

При выборе из всех путей допустимого ранга совокупности путей, минимизирующих длину ребер, становится возможным нормативное распределение потоков пропорционально длинам этих путей

$$x_k^t =]y_k^t V_k [\vee [y_k^t V_k];$$

$$y_k^t = \frac{l_k^t}{h_k};$$

$$\sum_{t=1}^m l_k^t$$

$$x_k^t \text{ — целое;}$$

$$k = \overline{1, m}, t = \overline{1, h_k},$$

где $]x[\vee[x]$ — округление x в сторону большего или меньшего целого числа.

На основании полученных значений интенсивностей потоков возможно уточнение местоположения терминалов.

Изложенные подходы и методика синтеза структуры системы снабжения ТС, ВТИ требуют дальнейшей проработки и уточнений, но логика рассуждений дает право утверждать, что предлагаемая методика применима для расчета рационального варианта топологической структуры системы и в отличие от известных учитывает не только критерий минимального расстояния, но и потоковую нагрузку на логистическую сеть.

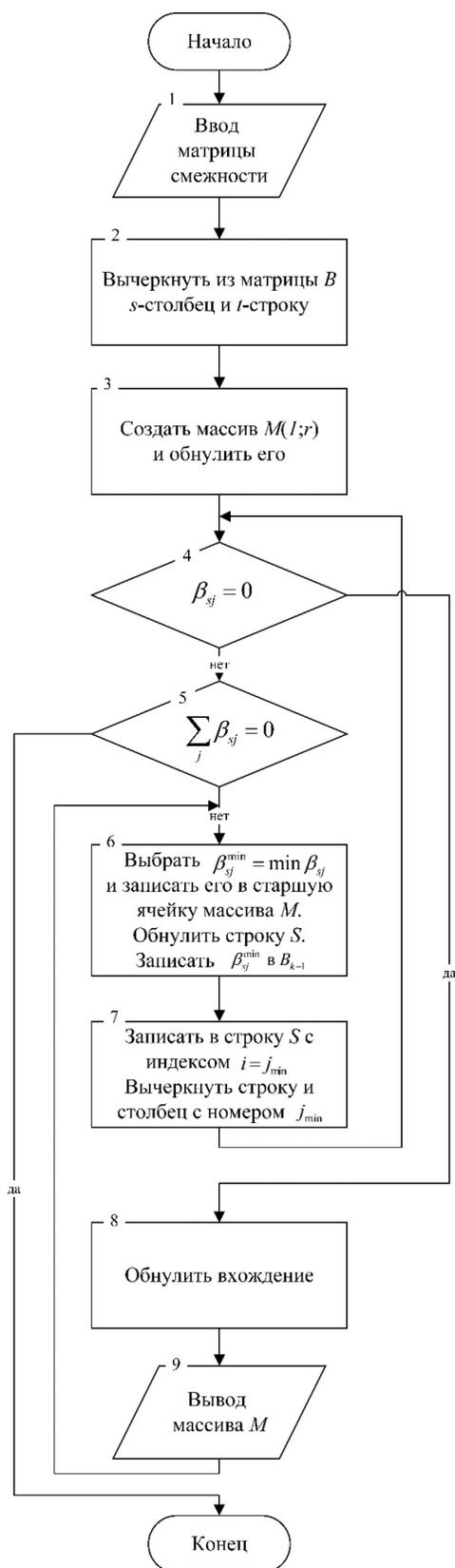


Рис. 3. Алгоритм перечисления путей допустимого ранга

Литература

1. Чихачев А.В., Третьяков С.М., Бурлаков А.А., Баринов М.А., Морозов А.В. Техническое обеспечение связи и автоматизации: Учебник. — СПб: ВАС. 2017. 302 с.
2. Руководство по техническому обеспечению связи и автоматизированных систем управления. — М.: МО. 2018. 230 с.
3. Таха, Хемди А. Введение в исследование операций, 7-е издание: Пер. с англ. — М.: Издательский дом «Вильямс». 2005. 912 с.
4. Боев В.Д., Сыпченко Р.П. Компьютерное моделирование. — М.: Национальный Открытый Университет «ИНТУИТ». 2016. 349 с.
5. Цвиркун А.Д., Акинфеев В.К., Филиппов В.А. Имитационное моделирование в задачах синтеза структуры сложных систем (оптимизационно-имитационный подход). — М. Наука. 1985. 173 с.
6. Логинов П.С. Применение метода k -средних и диаграмм Вороного для кластерного анализа базовых станций в телекоммуникациях // Перспективы науки. № 2. 2016. С. 59–63.
7. Тюрин А.Г., Зуев И.О. Кластерный анализ, методы и алгоритмы кластеризации // Вестник МГТУ МИРЭА. № 2 (3). 2014. С. 86–97.
8. Шитиков В.К., Мاستицкий С.Э. Классификация, регрессия, алгоритмы Data Mining с использованием R. Электронная книга, адрес доступа: <https://github.com/ranalytics/data-mining>
9. Латышев О.В., Лебедев А.Т., Мельников С.В. Формирование канального ресурса региональной транспортной сети связи специального назначения. — Новочеркасск. 2009. 129 с.
10. Мельник М.М. Экономико-математические методы и модели в планировании и управлении материально-техническим снабжением. — М.: Высш. шк. 1990. 208 с.
11. Рыжиков Ю.И. Теория очередей и управления запасами. Учебник для ВУЗов. — СПб: Питер. 2001. 384 с.

References

1. Chikhachev A.V., Tret'yakov S.M., Burlakov A.A., Barinov M.A., Morozov A.V. Communication and automation technical support. — St. Petersburg. 2017. 302 p.
2. Manual for technical support of communications and automated control systems. — Moscow: MO. 2018. 230 p.
3. Taha, Hemdi A. VIntroduction to operations research, 7th edition. — Moscow: «Williams». 2005. 912 p.
3. Boev V.D., Sypchenko R.P. Computer simulation. — Moscow: Nacional'nyj Otkrytyj Universitet «INTUIT». 2016. 349 p.
5. Tsvirkun A.D., Akinfeev V.K., Filippov V.A. Simulation modeling in the problems of synthesis of the structure of complex systems (optimization-simulation approach). — Moscow: Nauka. 1985. 173 p.
6. Loginov P.S. Application of the k-means method and Voronoi diagrams for cluster analysis of base stations in telecommunications. Perspektivy nauki. № 2. 2016. P. 59–63.
7. Tyurin A.G., Zuev I.O. Cluster analysis, methods and algorithms of clustering. Vestnik MGTU MIREA. № 2 (3). 2014. P. 86–97.
8. Shitikov V.K., Mastitsky S.E. Classification, regression, Data Mining algorithms using R. E-book, <https://github.com/ranalytics/data-mining>
9. Latsyshev O.V., Lebedev A.T., Melnikov S.V. Formation of the channel resource of the regional transport communication network for special purposes. — Novocherkassk. 2009. 129 p.
10. Melnik M.M. Economic and mathematical methods and models in planning and management of material and technical supply. — Moscow. Vysshaya shkola ekonomiki. 1990. 208 p.
11. Ryzhikov Yu.I. Queuing and inventory management theory. — St. Petersburg. 2001. 384 p.