

УДК 331.08

DOI: 10.25559/SITITO.16.202002.338-350

Алгоритмы ускорения работы модификации метода муравьиных колоний для поиска рационального назначения сотрудников на задачи с нечетким временем выполнения

В. А. Судаков¹, А. М. Батьковский², Ю. П. Титов^{3*}¹ ФГОБУ ВО «Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации», г. Москва, Россия, 125993, Россия, г. Москва, Ленинградский пр., д. 49² ЦНИИ «Электроника», г. Москва, Россия, 127299, Россия, г. Москва, ул. Космонавта Волкова, д. 12³ ФГУ «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук», г. Москва, Россия, 119333, Россия, г. Москва, ул. Вавилова, д. 44, корп. 2

* kalengul@mail.ru

Аннотация

Подход, использующий нечеткое время для определения времени выполнения наукоемкого проекта, требует решения задачи назначения сотрудников по задачам. В этом случае для каждого сотрудника и каждой задачи, которую может выполнить сотрудник, назначается нечеткая функция выполнения задачи. Распределение сотрудников по задачам успешно решает модификация метода муравьиных колоний, работающая с графом решений. Но скорость и точность работы метода зависит от оптимальности установленных его параметров, и алгоритм подвержен «защипыванию», ситуации, когда все агенты перемещаются по одному пути в графе решений, заноса на него много весов и не имея возможности на следующих итерациях выбрать другой маршрут в графе решений. Решить данные проблемы предлагается путем сброса графа решения при различных методах определения момента «защипывания». Момент защипывания предлагается определять по статистическим параметрам, вычисленным на одной итерации алгоритма. Алгоритм определения защипывания, при котором определяется, были ли найдены новые решения на итерации, показал более высокую производительность. Но данный подход требует хранения всех найденных решений, что хорошо работает в случае, если вычисление критерия занимает серьезное время моделирования. Кроме того идеи сброса графа решений позволяют решить некоторые проблемы установки неэффективных параметров метода муравьиных колоний. Для ускорения процесса нахождения рациональных путей в работе рассматривается возможность занесения различных начальных весов после сброса графа решений. Наиболее эффективным будет добавление весов от 2-х до 5-ти наилучших путей, найденных агентами за время работы метода муравьиных колоний. В дальнейшем предлагается рассматривать многокритериальную задачу о назначениях и различные алгоритмы применения нечетких множеств при календарном планировании задач.

Ключевые слова: метод муравьиных колоний, задача о назначении, нечеткие множества, календарное планирование.

Финансирование: исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научных проектов № 18-00-00012 (18-00-00011) Комфи.

Для цитирования: Судаков, В. А. Алгоритмы ускорения работы модификации метода муравьиных колоний для поиска рационального назначения сотрудников на задачи с нечетким временем выполнения / В. А. Судаков, А. М. Батьковский, Ю. П. Титов. – DOI 10.25559/SITITO.16.202002.338-350 // Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2020. – Т. 16, № 2. – С. 338-350.

© Судаков В. А., Батьковский А. М., Титов Ю. П., 2020



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.



Algorithms for Accelerating the Operation of Modification of the Ant Colony Method for Searching Rational Assignment of Employees to Tasks with Fuzzy Time of Execution

V. A. Sudakov^a, A. M. Batikovskii^b, Yu. P. Titov^{c*}

^a Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russia
49 Leningradsky Prospekt, Moscow 125993, Russia

^b CRI Electronics, Moscow, Russia

12 Kosmonavta Volkova St., Moscow 127299, Russia

^c Federal Research Center "Computer Science and Control" of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

44-2 Vavilova St., Moscow 119333, Russia

* kalengul@mail.ru

Abstract

The approach that uses fuzzy time to determine the lead time of a knowledge-intensive project requires solving the problem of assigning employees to tasks. In this case, for each employee and each task that the employee can perform, a fuzzy task execution function is assigned. The distribution of employees by tasks is successfully solved by a modification of the Ant Colony Method that works with a decision graph. But the speed and accuracy of the method depends on the optimality of its parameters, and the algorithm is subject to "looping", a situation when all agents move along the same path in the decision graph, putting many weights on it and not being able to choose another route in the graph at the next iterations solutions. It is proposed to solve these problems by resetting the decision graph with different methods of determining the moment of "looping". The looping moment is proposed to be determined by the statistical parameters calculated at one iteration of the algorithm. The loop detection algorithm, in which it is determined whether new solutions were found during iteration, showed better performance. But this approach requires storing all found solutions, which works well if the calculation of the criterion takes a lot of simulation time. In addition, the idea of resetting the decision graph allows us to solve some problems of setting ineffective parameters of the Ant Colony Method. To speed up the process of finding rational paths in the work, the possibility of entering various initial weights after resetting the decision graph is considered. The most effective way will be to add weights from 2 to 5 of the best paths found by the agents during the operation of the Ant Colony Method. In the future, it is proposed to consider the multicriteria assignment problem and various algorithms for using fuzzy sets in the scheduling of tasks.

Keywords: Ant Colony Method, Assignment Problem, Fuzzy Sets, Scheduling.

Funding: The research was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research within the framework of scientific projects No. 18-00-00012 (18-00-00011) Komfi.

For citation: Sudakov V.A., Batikovskii A.M., Titov Yu.P. Algorithms for Accelerating the Operation of Modification of the Ant Colony Method for Searching Rational Assignment of Employees to Tasks with Fuzzy Time of Execution. *Sovremennye informacionnye tehnologii i IT-obrazovanie* = Modern Information Technologies and IT-Education. 2020; 16(2):338-350. DOI: <https://doi.org/10.25559/SITI-TO.16.202002.338-350>



Введение

Современный подход, связанный с управлением процессом выполнения работ на наукоемком проекте, обычно оперирует временами выполнения отдельных этапов всей работы и ее задач. Для определения времени выполнения задачи используют оценку времени выполнения подобной задачи. Оперирование длительностью выполнения всей работы осуществляют с помощью Метода критического пути (СРМ) [1-2], PERT [3-4] и диаграмм Ганта [5]. При определении времени выполнения задачи, руководитель оперирует подразделениями и укомплектованными командами, состоящими из нескольких человек. Изменение времени выполнения задачи или этапа, связанные с различной укомплектованностью этих команд обычно определяются рисками, вычисление которых является отдельной задачей.

В современных подходах методу СРМ стали применять нечеткие множества для задания времени выполнения задачи [6-12]. Нечеткость в определении времени выполнения задачи или этапа призвана учесть возможные риски и задержки. Задание соответствующих функций принадлежности является задачей эксперта-руководителя. Например, при гибкой методологии разработки программного обеспечения¹ (Agile [13-15]) владелец продукта и другие работники постоянно должны оценивать сроки выполнения (объемы) отдельных задач для их последующего выбора и выполнения. В данном подходе руководитель основывается на скорости выполнения задач командой разработчиков в прошлом. Тем не менее, участие работников в процессе определения сроков обязательна. В инновационных проектах не всегда имеется возможность оценить время выполнения задачи даже в виде нечеткого множества. Обычно это связано с отсутствием опыта в разработке подобных проектов. В таких случаях в качестве эксперта для оценки времени выполнения проекта опрашивают самого работника или руководителя команды. Но такой подход предполагает ограничение, что работник выполняет задачу в одиночку, иначе оценить время с достаточной точностью невозможно.

Описан математический аппарат, который на основе нечетких множеств времени выполнения задачи каждым из работников позволяет вычислить итоговое время выполнения задачи [16]. Имеются различные алгоритмы учета необходимости взаимодействия работников, назначенных на одну задачу. Подобные решения позволяют в инновационных проектах проводить опрос работника о времени выполнения различных задач, а, после сбора необходимых данных, решать задачу о назначении работников по задачам с учетом задержек на взаимодействие. По результатам вычислений можно получить нечеткие функции времени выполнения отдельных задач и этапов работы и работы в целом при определенном назначении работников. При этом при опросе работников можно интересоваться его возможностями выполнения не только задач, которые он делает лучше всего, но и других видов задач, которые работник способен выполнить. В итоге можно получить гибкую систему планирования назначения работников на задачи.

В работе рассматривается модификация метода муравьиных колоний [17-20], предназначенная для поиска рациональ-

ных назначений работников на задачи. Данная модификация позволяет осуществить направленный перебор путей из графа решений. Каждое решение определяет назначение каждого отдельного работника на конкретную задачу. После определения всех работников, назначенных на задачу, нечеткой функции времени выполнения задачи, дефаззификации и получения времени выполнения всей работы можно по полученному времени проводить минимизацию. При этом рассматривались два алгоритма остановки метода муравьиных колоний: по определенному количеству итераций и при достижении определенного значения критерия. Но критерий остановки не спасает от «заикливания» алгоритма муравьиных колоний, ситуации, когда все агенты (муравьи) выбирают один и тоже путь, заноса на него очень большое количество веса (феромона), и не рассматривая альтернативные решения. В работе предлагаются алгоритмы ускорения работы метода муравьиных колоний и решения проблемы заикливания.

Модификация метода муравьиных колоний

Для решения задачи о назначении работников предлагается применять модификацию метода муравьиных колоний, работающую на специальном графе решений [21]. В графе решений создается по одной вершине для каждой нечеткой функции «выполнение работником задачи», т.е. для каждой пары работник и задача, которая может существовать. Все вершины, относящиеся к одному работнику, условно объединяются в слои, и слои упорядочиваются. Дугами соединяются вершины из соседних слоев, причем таким образом, чтобы из каждой вершины одного слоя можно перейти в каждую вершину соседнего слоя. В результате в данном графе можно составить множество маршрутов, которые проходят по одной вершине из каждого слоя, т.е. для каждого работника определяется задача, которую он будет выполнять. После определения такого назначения можно вычислить всех работников, назначенных на каждую задачу, можно вычислить обобщенную функцию времени выполнения задачи с учетом необходимости взаимодействия работников. Следует отметить, что за счет взаимодействия работников время выполнения работы при добавлении нового работника может возрасти. Этот эффект приводит к необходимости добавления в каждый слой вершины, определяющей отсутствие назначения работника на задачу. После дефаззификации нечеткой функции выполнения задачи получается некоторая оценка времени выполнения для каждой задачи, что впоследствии позволяет определять время выполнения всей работы. Оценка времени выполнения всей работы можно использовать в качестве оптимизационной переменной задачи о назначении.

Модификация метода муравьиных колоний позволяет проводить выбор пути в графе решений и обеспечить направленный, в сторону минимизации оптимизационной переменной, поиск пути. Для этого необходимо модифицировать следующие элементы алгоритма муравьиных колоний: Веса заносятся на вершины, а не на дуги; Все агенты перемещаются от вершин первого слоя до вершин последнего слоя; Показатель

1 Beck K. [et al.] Manifesto for Agile Software Development [Электронный ресурс]. URL: <http://agilemanifesto.org> (дата обращения: 02.09.2020).



длины пути не учитывается при вероятностном определении перехода агента. Конечным результатом работы модифицированного метода муравьиных колоний является поиск субоптимального или рационального решения. Но, в случае, отсутствия информации об оптимальном решении, например, неизвестно даже приблизительные значения критериев оптимального решения, невозможно определить алгоритм остановки метода муравьиных колоний, который бы с высокой вероятностью обеспечивал бы нахождение данного решения. При использовании ограничения на количество итераций, его увеличение не приводит к резкому улучшению найденного решения из-за эффекта «заикливания», т.е. итерационном выборе агентами одних и тех же путей. Использование же в качестве критерия остановки алгоритма поиск решения, удовлетворяющего ограничениям, влечет за собой неясность установки этого ограничения и неоднозначность получаемых результатов, решение по ограничениям не найдено из-за того, что оно не существует или алгоритм «заиклился». В рамках данной работы рассмотрим алгоритмы, позволяющие как помочь с поиском рациональных решений, так и ускорить процесс нахождения этого решения.

Сброс графа решений

Для решения проблем заикливания предлагается при обнаружении состояния заикливания обнулять веса в графе решений, так сказать «сбрасывать» граф решений к начальному состоянию. В результате при большом количестве итераций граф решений будет несколько раз обновляться, что позволит рассмотреть больше различных решений. При бесконечном числе итераций при таком подходе точно будет найдено оптимальное решение.

В работе предлагается определять состояние заикливания следующими способами:

1. На итерации не было найдено ни одного нового решения. Данный метод работает только в том случае, если хранится множество решений. Алгоритмически выполнить проверку просто, достаточно сравнить размерность множества решений до и после итерации. Данный подход чаще других сбрасывает граф решений, так как он не учитывает, что на итерации агенты могут выбирать различные пути, а учитывает только процесс увеличения множества рассмотренных решений. (светло-серые треугольники на графиках);
2. Математическое ожидание значений критериев решений, найденных на итерации, равно значению на предыдущей итерации. Данный критерий позволяет судить о том, что агенты между итерациями выбирают одинаковые пути. С большой вероятностью при этом можно предположить, что и дальше, на следующей итерации, агенты выберут те же пути. (темно-серые квадраты на графиках).

Проводить анализ эффективности применяемых методов будем по следующим критериям:

- количество итераций алгоритма муравьиных колоний, которое потребовалось для нахождения решения, удовлетворяющего ограничениям;
- количество рассмотренных решений при поиске решения, удовлетворяющего ограничениям;

- вероятность успешного прогона, т.е. прогона в котором было найдено решение, удовлетворяющее ограничениям, и количество итераций не достигло числа, при котором алгоритм считается заиклившимся.

Для анализа эффективности предлагаемых модификаций алгоритма муравьиных колоний рассматривалась задача назначения 35 работников по 15 задачам разработки нового программного обеспечения. В итоге рассматривалось более 180 функций принадлежности «выполнение задачи конкретным работником». Взаимодействие работников, назначенных на одну задачу, учитывалась по принципу наставничества, когда учитывалось взаимодействие всех работников, только с самым опытным работником. В случае если на задачу не назначено работников, то время ее выполнения приравнивается к условной бесконечности. На графиках приводится оценка математического ожидания и доверительный интервал (штриховой линией) этой оценки для доверительной вероятности 0,99. Оценка вычисляется по 500 реализациям метода муравьиных колоний. Для оптимального решения 358 было установлено ограничение на критерий 380, при этом алгоритм заканчивает работу при любом найденном решении, удовлетворяющего ограничениям. На заикливание установлено ограничение в 1000 итераций. Черными ромбами отмечены результаты работы метода муравьиных колоний без применения сброса графа решений.

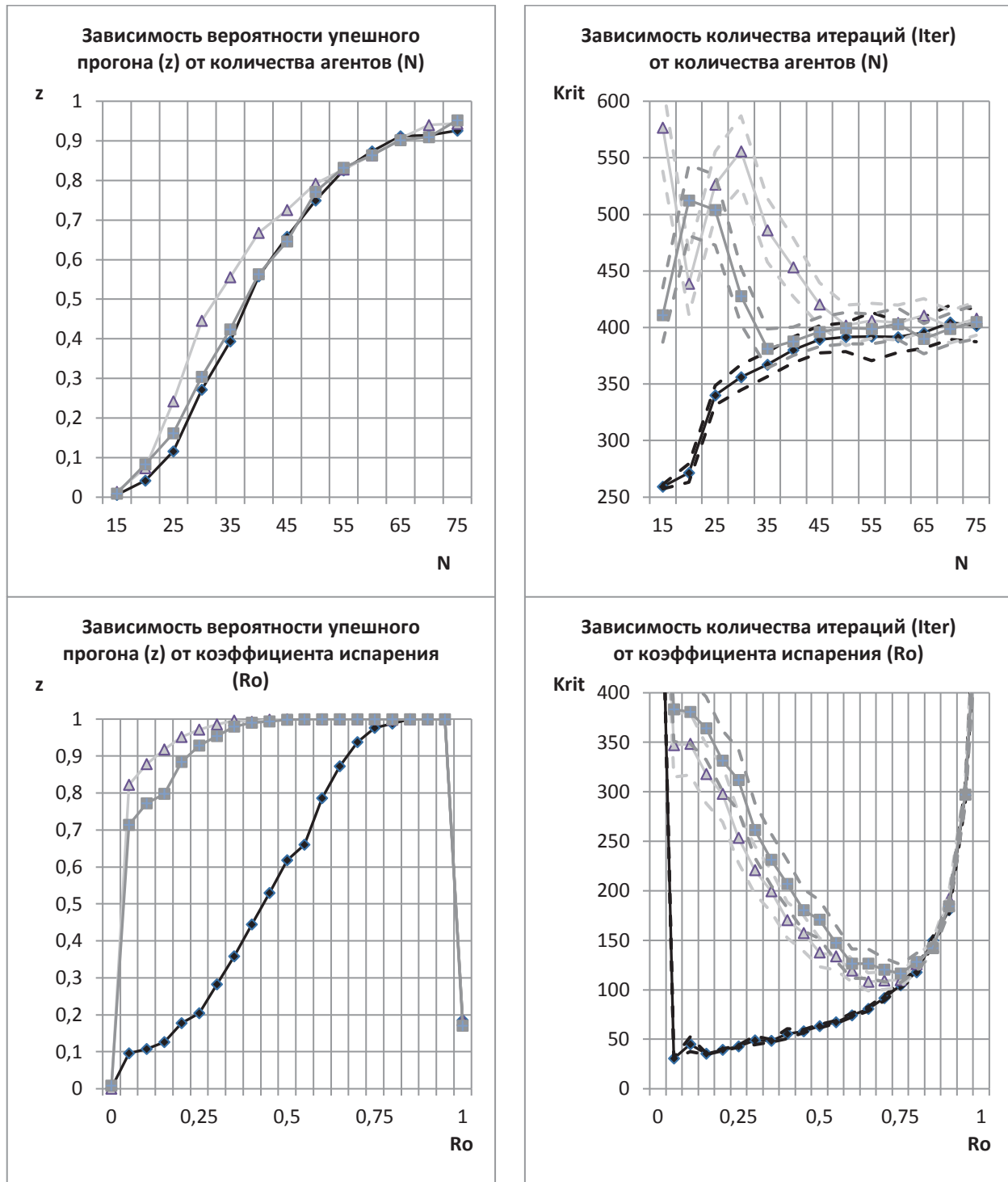
Оценим влияние предложенных алгоритмов на критерии оценки эффективности работы метода муравьиных колоний при варьировании параметров: Количество агентов в группе, Коэффициент испарения весов.

На графиках (рис. 1) отчетливо видно, как предложенные алгоритмы борются с проблемой заикливания для неоптимальных параметров метода муравьиных колоний. Для параметра, отвечающего за количество агентов в одной группе это влияние не столь значительно, при количестве агентов от 20 до 40 процент успешных прогонов вырос только на 10%, и при этом все еще большая часть прогонов заканчивалась «заикливанием». Это обусловлено итоговым низким количеством возможных рассмотренных решений, например, для 20 агентов при ограничении на заикливание 1000 итераций максимальное количество рассмотренных решений 20 000. Т.е. существует граница количества необходимых решений для уверенного поиска оптимального. Такую проблему можно решать не только увеличением количества агентов, но и увеличением числа итераций для «заикливания» алгоритма.

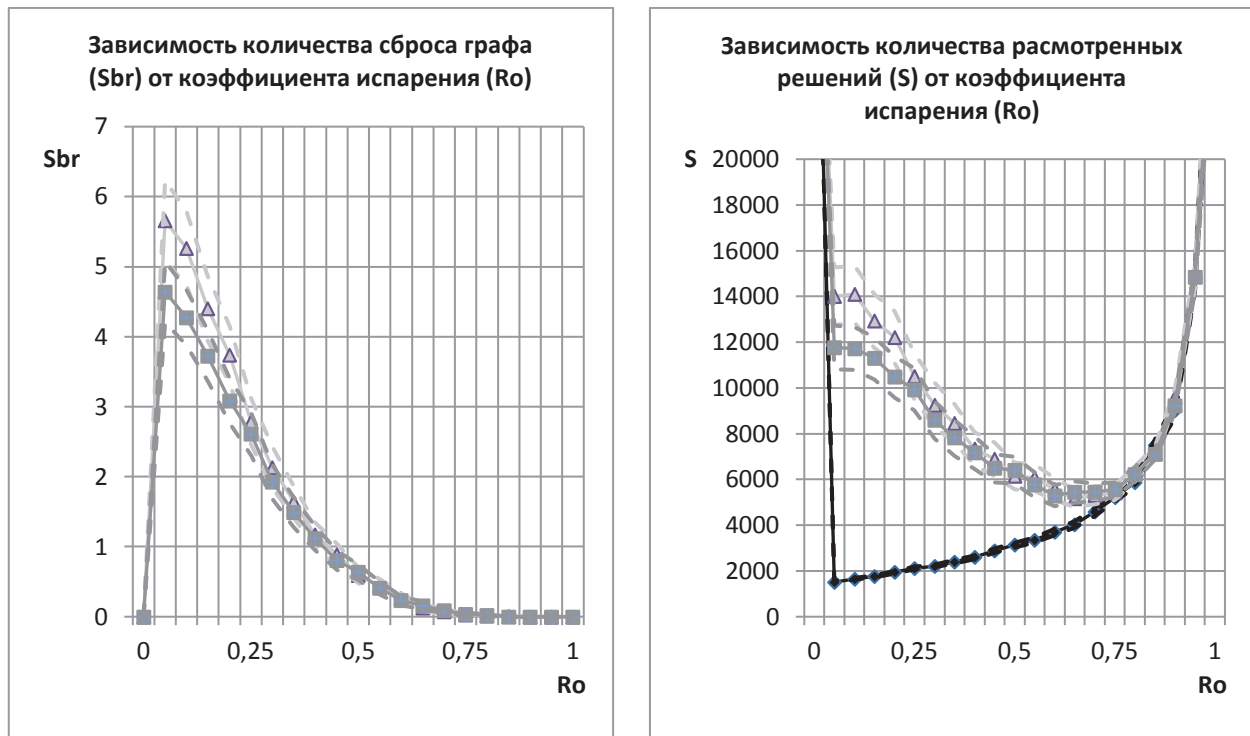
А вот с неоптимальным коэффициентом испарения алгоритм справился хорошо, показывая при значениях больше 0,25 успешность более 95%. (рис. 1) Но такой успех привел к резкому возрастанию числа итераций метода муравьиных колоний, а, следовательно, и времени поиска решения. Оптимальным параметром коэффициента испарения будет значение из диапазона (0,8; 0,95), при них сброс графа попросту не происходит. По всем графикам сброс графа решений при отсутствии новых найденных решений на итерации (светло-серые треугольники) показывает наилучшие результаты.

Рассмотрим влияние количества итераций, определяющего заикливание алгоритма, на качество работы метода муравьиных колоний с применением процедуры сброса графа решений. (рис. 2)

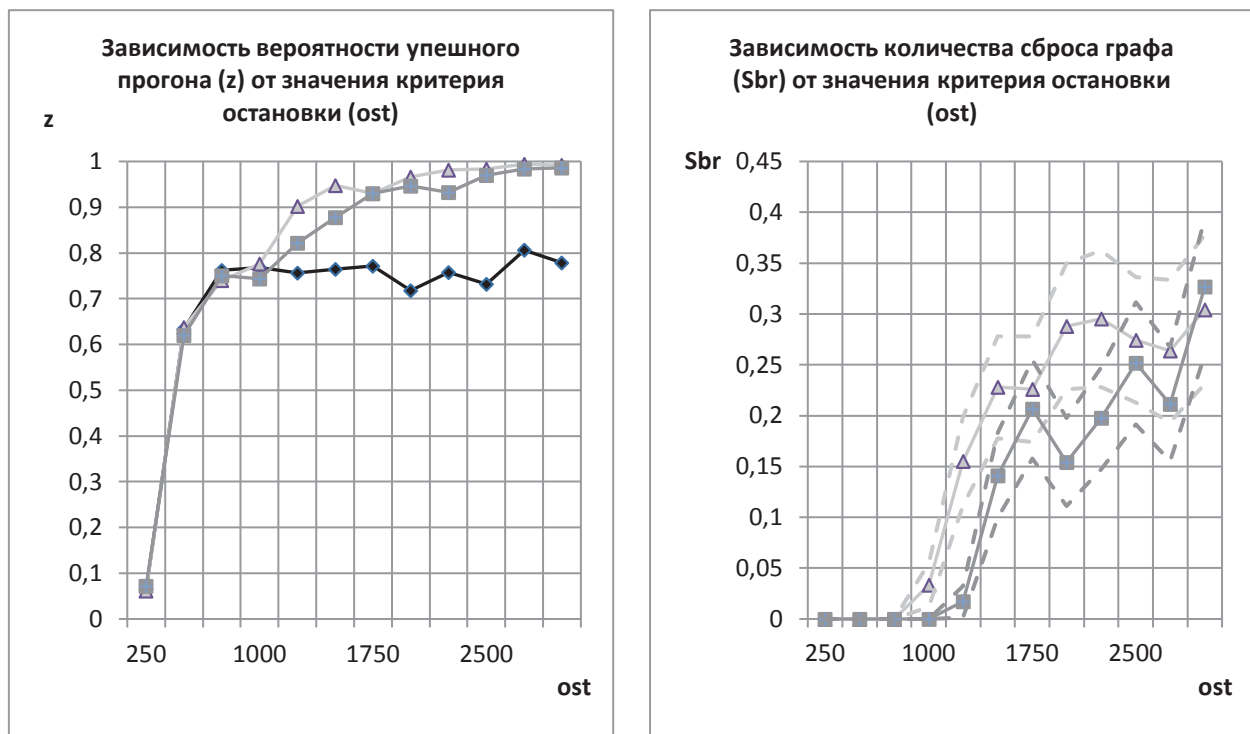




Р и с. 1. Оценка влияния алгоритмов сброса графа решений на критерии оценки эффективности работы метода муравьиных колоний
 Fig. 1. Evaluation of the influence of algorithms for resetting the decision graph on the criteria for assessing the effectiveness of the Ant Colony Method

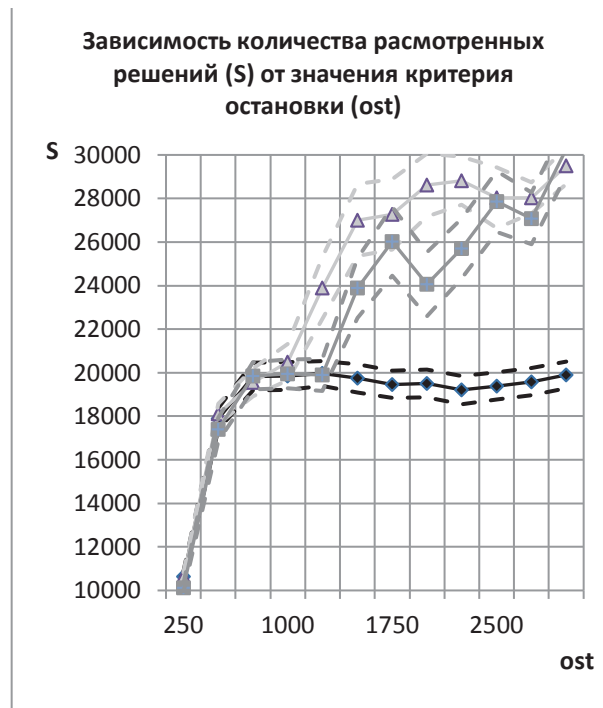


Р и с. 1. Оценка влияния алгоритмов сброса графа решений на критерии оценки эффективности работы метода муравьиных колоний
F i g. 1. Evaluation of the influence of algorithms for resetting the decision graph on the criteria for assessing the effectiveness of the Ant Colony Method



Р и с. 2. Оценка влияния алгоритмов сброса графа решений и значения критерия остановки алгоритма для обнаружения «зацикливания» на критерии оценки эффективности работы метода муравьиных колоний
F i g. 2. Evaluation of the influence of algorithms for resetting the decision graph and the value of the algorithm stopping criterion for detecting "looping" on the criteria for evaluating the effectiveness of the Ant Colony Method





Р и с. 2. Оценка влияния алгоритмов сброса графа решений и значения критерия остановки алгоритма для обнаружения «зацикливания» на критерии оценки эффективности работы метода муравьиных колоний

Fig. 2. Evaluation of the influence of algorithms for resetting the decision graph and the value of the algorithm stopping criterion for detecting "looping" on the criteria for evaluating the effectiveness of the Ant Colony Method

Главную проблему алгоритма муравьиных колоний, зацикливание графа (количество успешных прогонов не превосходит 0,8 при любом количестве итераций, определяющих зацикливание, черные ромбы), оба алгоритма успешно решают. Уже при количестве итераций равном 1750 процент успешных прогонов превосходит 95% в обоих алгоритмах. Но это сопряжено с увеличением количества сбросов графа решений и, вследствие чего, возрастания количества итераций алгоритма и количества рассмотренных решений, что означает увеличение времени поиска. Из-за различного поведения алгоритма в результате сброса доверительные интервалы оценки математического ожидания большие, т.е. итерации алгоритма сильно отличаются. При этом сброс графа происходит чаще, если в качестве критерия выбирать количество решений, что приводит к лучшим показателям по проценту успешных прогонов. При использовании алгоритма остановки прогона при достижении ограничений применение сброса графа решений также дает улучшение вероятности нахождения решения и увеличение времени этого поиска.

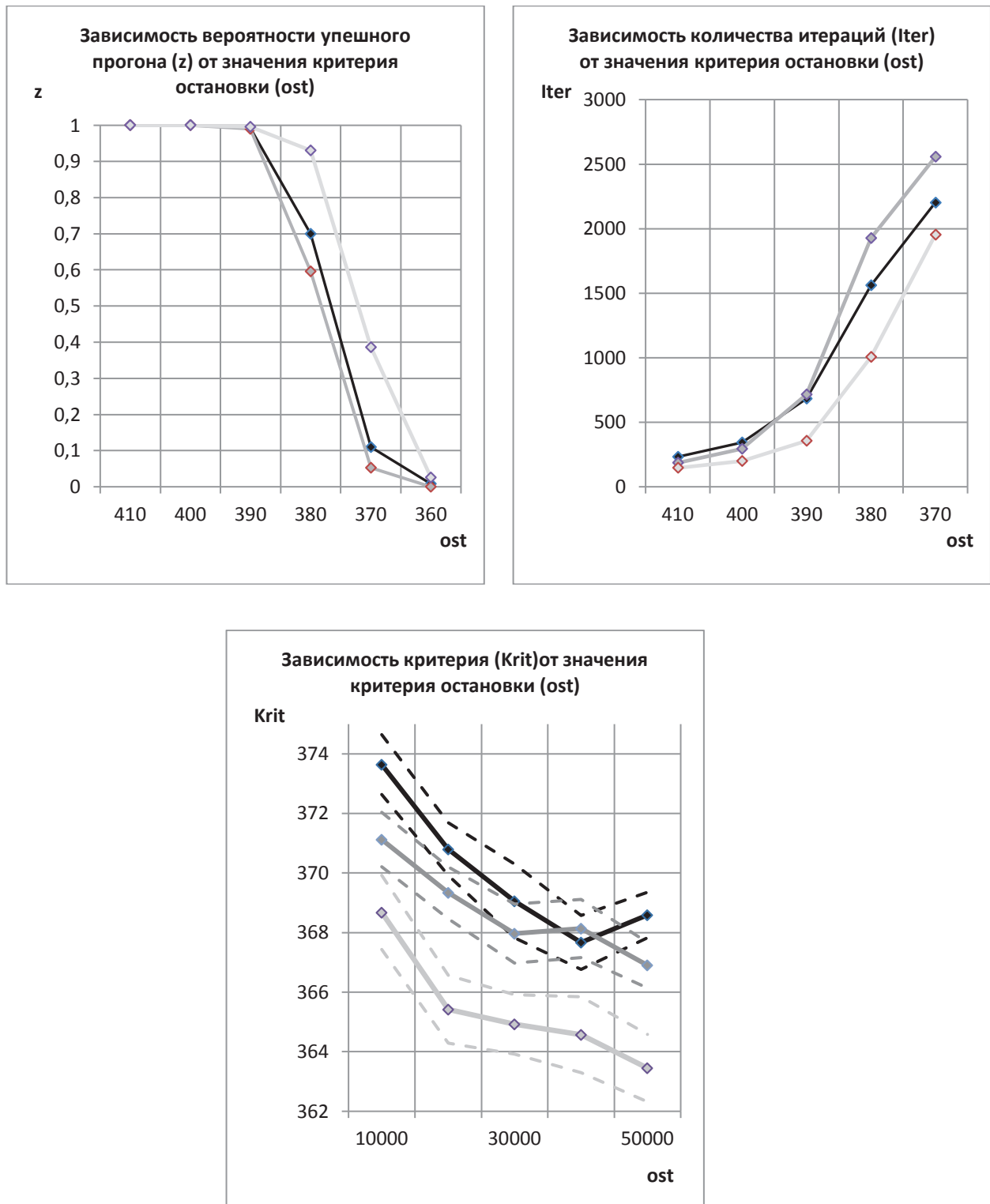
Следует отметить, что время выполнения каждой итерации алгоритма в одном прогоне не одинаковое. Это происходит из-за необходимости хранения всех решений и поиска, найденного агентом, во множестве решений. Такая особенность необходима для задач, в которых время вычисления значений критериев системы по определенному решению сильно больше времени работы метода муравьиных колоний, например, если вычислением критериев занимается имитационная модель. В нашем случае математические операции вычисления суммарного времени достаточно простые и можно не хранить весь массив решений, что приведет к резкому ускорению рабо-

ты алгоритма для задач, требующих рассмотрения большого количества решений. Но, в таком случае, и применение алгоритма сброса графа по количеству решений использовать, возможно, но затруднительно.

Занесение начального веса на граф решений

Другой важной особенностью метода муравьиных колоний по сравнению с другими метаэвристическими алгоритмами является возможность заносить зависимый начальный вес на граф решений. Данная особенность позволяет начинать сразу с рациональных решений. Для вычисления начального веса можно применить алгоритм дефаззификации к нечеткой функции «выполнение задачи i -ой работником j -м». Этот вес необходимо будет занести на вершину графа решений, определяющее назначение j -го работника на i -ю задачу. Так как вес не является конечным решением, а только необходимым инструментом для выбора рационального назначения работников, то алгоритм дефаззификации нечеткой функции для вычисления начальных весов должен совпадать с алгоритмом дефаззификации обобщенной функции принадлежности.

В работе рассматривается алгоритм дефаззификации, выбирающий «пессимистичное» время выполнения задачи, т.е. время при котором функция принадлежности принимает значение 1. Рассмотрим влияние занесения начального веса на граф решений на эффективность алгоритма муравьиных колоний. На рисунке 3 черным графиком отмечается одинаковое начальное значение весов, а темно-серым – полученное в результате дефаззификации. Верхние графики рассматривают влияние



Р и с. 3. Оценка влияния занесения начальных весов и алгоритмов сброса графа решений на критерии оценки эффективности работы метода муравьиных колоний при изменении значения критерия останковки

Fig. 3. Evaluation of the influence of entering the initial weights and algorithms for resetting the decision graph on the criteria for evaluating the effectiveness of the Ant Colony Method when the value of the stopping criterion changes



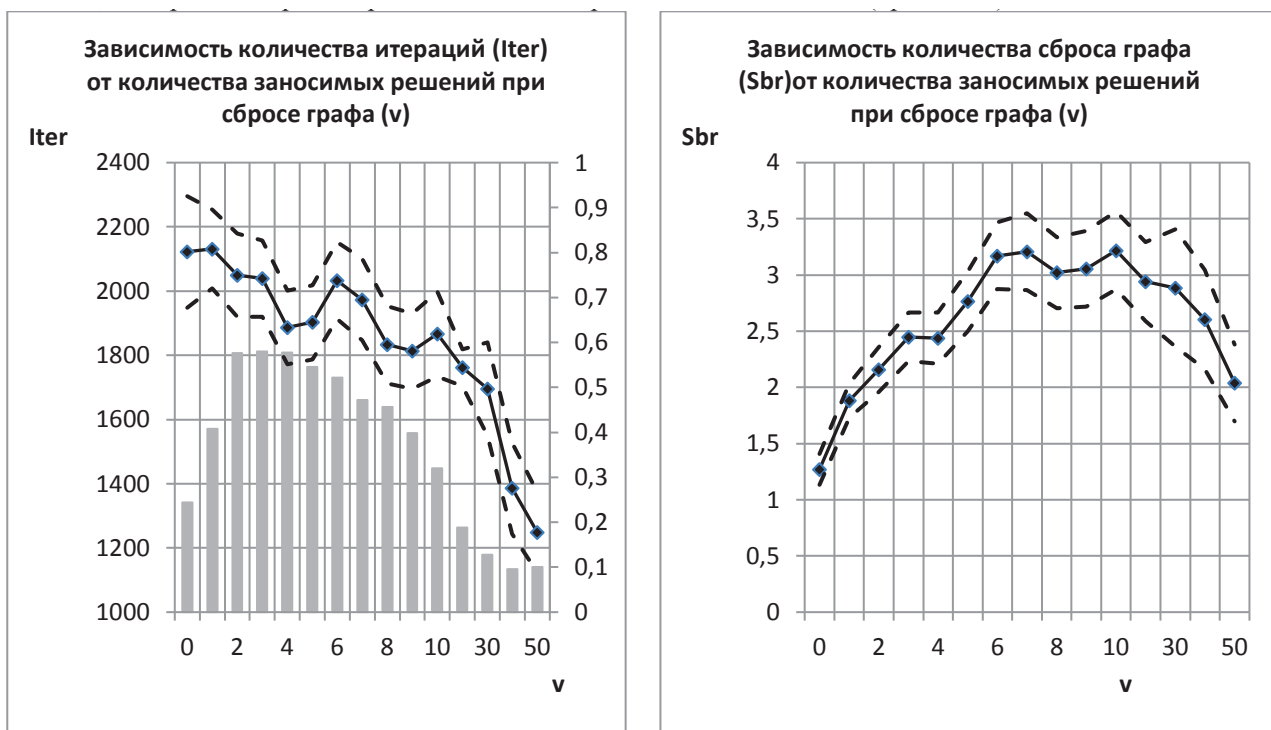
занесения начальных весов при алгоритме остановки метода по нахождению решения, удовлетворяющего ограничениям при заикливания в 1000 итераций, а нижний график - при критерии остановки по конкретному числу итераций метода муравьиных колоний. По графикам видно, что начальные веса, вычисленные в результате дефаззификации, улучшают решения только при небольшом числе итераций.

Стоит рассмотреть ситуацию, возникающую после сброса графа решений. При использовании зависимых весов в результате сброса графа решений начальными весами будут тоже различные значения. Но, в отличие от запуска алгоритма, при сбросе графа решений имеется информация о «хороших решениях». Предлагается после сброса графа решений добавлять на него веса от лучшего, найденного на данный момент, решения. На рисунке 3 светло-серым графиком отмечены результаты такого управления начальным значением весов.

Добавление начальных весов при сбросе графа решений от лучшего найденного решения – эффективное средство ускорения работы алгоритма. Занесение зависимых начальных весов приводит к старту алгоритма муравьиных колоний из области занесенного решения после сброса графа. В результате, если решения сильно различаются по составу, но близкие по значению критерия, то алгоритм найдет только одно направление. Из графиков можно сделать вывод, что занесение весов на граф от лучших, найденных решений не только ускоряет работу алгоритма, но и увеличивает процент успешных прогонов. Рассмотрим возможность занесения весов от множества лучших решений, отсортированных по возрастанию значения

критерия. При этом стоит установить более серьезное ограничение на значение критерия, равное 370, но количество итераций для заикливания оставить равным 1000. Результаты отображены на рисунке 4, гистограммой отображена вероятность «успешного» прогона метода муравьиных колоний, т.е. прогонов при котором количество итераций не достигло 1000 (правая ось).

Как видно из графиков наилучшее значение количества заносимых решений при сбросе графа варьируется от 2-х до 5-ти. При таких значениях обеспечивается максимальное количество успешных прогонов. Следует отметить, что практически все значения, кроме очень высоких 20 и больше, обеспечивают больше количество успешных итераций, чем при отсутствии занесения решений на граф (при значении равном 0). Число итераций при изменении количества заносимых решений уменьшается, так как занесение рационального распределения весов на граф приводит к более быстрому поиску решения, удовлетворяющего ограничениям. Но количество сбросов графа увеличивается, при увеличении количества заносимых решений до 6-ти. Далее же следует постоянные значения числа сбросов графа с последующим его уменьшением. Это связано с тем, что заносимые решения влияют на начальное движение агентов, в результате большинство агентов проходят по одним и тем же маршрутам, что приводит к частым сбросам графа. Но при большом количестве заносимых маршрутов при сбросе графа выбор у агентов увеличивается, что приводит к уменьшению числа сбросов графа решений.



Р и с. 4. Оценка влияния занесения начальных весов от множества на критерии оценки эффективности работы метода муравьиных колоний при изменении значения критерия остановки

Fig. 4. Evaluation of the influence of entering the initial weights from the set on the criteria for evaluating the effectiveness of the Ant Colony Method when the value of the stopping criterion changes



Заключение

В целом можно проводить и бесконечный поиск решения, удовлетворяющего ограничениям, установив критерий зави- сания очень большим. Если же установлены невыполнимые ограничения, то можно отслеживать лучшее решение, кото- рое будет постепенно улучшаться. При этом стоит использо- вать алгоритмы сброса графа и занесения зависимых весов на граф, так как иначе алгоритм муравьиных колоний может заикнуться на одном решении и не улучшать его в течение работы алгоритма.

В работе рассмотрены различные алгоритмы поиска заикли- вания графа и последующего его сброса, т.е. возвращения к пер- вонаначальному состоянию для продолжения поиска решений. Сброс графа решений позволяет, как избавиться от заикливан- ний алгоритма, так и улучшить работу алгоритма при неопти- мальных параметрах. При этом сбрасывать граф лучше всего в случае, если на итерации метода муравьиных колоний не было найдено новых решений, но этот алгоритм нуждается в запо- минании решений в процессе работы алгоритма.

Применение процедуры занесения различных весов при старте алгоритма дает не укоренение процесса нахождения решений. При сбросе графа решений можно установить тоже различное значение весов. Но в процессе работы алгоритма появляется информация о рациональных решениях. Занесе- ние дополнительных весов при сбросе графа ускоряет работу алгоритма. При этом оптимальным количеством добавленных решений, возрастающих по значению критерия, от 2-х до 5-ти. Дальнейшее увеличение количества заносимых маршрутов может привести к ухудшению эффективности работы метода муравьиных колоний.

Дальнейшее развитие алгоритма может учитывать различные алгоритмы дефаззификации нечеткой переменной и вычис- лять время выполнения работы исходя из календарного пла- на [22-26]. Кроме того алгоритм муравьиных колоний может решать многокритериальную задачу о назначении [27]. При этом использовать критерий время-стоимость или другие дополнительные критерии по равномерности загруженности ресурсов.

Список использованных источников

- [1] de la Garza, J. M. Application of the Resource-Con- strained Critical Path Method to Multiple Calendars and Progressed Schedules / J. M. de la Garza, K. Kim. – DOI 10.1061/41020(339)93 // Building a Sustainable Future. Proceedings of Construction Research Congress 2009; S. T. Ariaratnam, E. M. Rojas (ed.) American Society of Civil Engineers, 2009. – Pp. 916-925. – URL: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/41020%28339%2993> (дата обращения: 02.09.2020).
- [2] Kim, K. Critical Path Method with Multiple Calendars / K. Kim, J. M. de la Garza. – DOI 10.1061/(ASCE)0733-9364(2005)131:3(330) // Journal of Construction Engineering and Management. – 2005. – Vol. 13, Issue 3. – Pp. 330-342. – URL: <https://ascelibrary.org/doi/full/10.1061/%28ASCE%290733-9364%282005%29131%3A3%28330%29?mobileUi=0> (дата обращения: 02.09.2020).
- [3] Naili, M. Uncertainty in the Pert's Critical Path / M. Naili, M. Naili, A. Tari. – DOI 10.20319/mijst.2018.41.0109 // Inter- national Journal of Science and Technology. – 2018. – Vol. 4, No. 1. – Pp. 1-9. – URL: <https://www.grdspublishing.org/index.php/matter/article/view/1180> (дата обращения: 02.09.2020).
- [4] Бондаренко, А. Н. Метод PERT в управлении проектами / А. Н. Бондаренко, А. В. Шаврин // Управление проектами и программами. – 2016. – № 1. – С. 68-78. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25441318> (дата обращения: 02.09.2020).
- [5] Wilson, J. M. Gantt Charts: A Centenary Appreciation / J. M. Wilson. – DOI 10.1016/S0377-2217(02)00769-5 // Euro- pean Journal of Operational Research. – 2003. – Vol. 149, Issue 2. – Pp. 430-437. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221702007695> (дата об- ращения: 02.09.2020).
- [6] Chen, S. P. A Simple Approach to Fuzzy Critical Path Anal- ysis in Project Networks / S. P. Chen, Y. J. Hsueh. – DOI 10.1016/j.apm.2007.04.009 // Applied Mathematical Modelling. – 2008. – Vol. 32, Issue 7. – Pp. 1289-1297. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0307904X07001047> (дата обращения: 02.09.2020).
- [7] Liu, S. T. Fuzzy Activity Times in Critical Path and Project Crash- ing Problems / S. T. Liu. – DOI 10.1080/01969720302865 // Cybernetics and Systems: An international Journal. – 2003. – Vol. 34, Issue 2. – Pp. 161-172. – URL: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01969720302865> (дата обращения: 02.09.2020).
- [8] Popescu, C.-C. On Critical Path with Fuzzy Weights / C.-C. Popescu, M. Giuclea. – DOI 10.24818/18423264/52.4.18.04 // Economic Computation and Economic Cybernetics Studies and Research. – 2018. – Vol. 52, Issue 4. – Pp. 49-60. – URL: http://ecocyb.ase.ro/nr2018_4/04%20-%20Popescu%20Ciprian%20Marius%20Giuclea.pdf (дата обращения: 02.09.2020).
- [9] Shih, P. C. Analysis of critical paths in a project network with fuzzy activity times / P. C. Shih. – DOI 10.1016/j.ejor.2006.06.053 // European Journal of Operational Re- search. – 2007. – Vol. 183, Issue 1. – Pp. 442-459. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221706006138> (дата обращения: 02.09.2020).
- [10] Zieliński, P. On computing the latest starting times and floats of activities in a network with imprecise durations / P. Zieliński. – DOI 10.1016/j.fss.2004.08.007 // Fuzzy Sets and Systems. – 2005. – Vol. 150, Issue 1. – Pp. 53-76. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165011404003550> (дата обращения: 02.09.2020).
- [11] Nasution, S. H. Fuzzy critical path method / S. H. Nasution. – DOI 10.1109/21.259685 // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. – 1994. – Vol. 24, No. 1. – Pp. 48-57. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/259685> (дата обращения: 02.09.2020).
- [12] Chen, C.-T. Applying fuzzy method for measuring criticality in project network / C.-T. Chen, S.-F. Huang. – DOI 10.1016/j.ins.2007.01.035 // Information Sciences. – 2007. – Vol. 177, Issue 12. – Pp. 2448-2458. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020025507000576> (дата обращения: 02.09.2020).
- [13] Bushuyeva, N. AGILE Leadership of Managing Innovation Projects / N. Bushuyeva, D. Bushuieva, V. Bushuieva. – DOI



- 10.30837/2522-9818.2019.10.077 // Innovate Technologies & Scientific Solutions for Industries. – 2019. – Vol. 4, Issue 10. – Pp. 77-84. – URL: <http://journals.uran.ua/itssi/article/view/2522-9818.2019.10.077> (дата обращения: 02.09.2020).
- [14] Koçyiğit, Y. The Role of Organizational Flexibility in Organizational Agility: A Research on SMEs / Y. Koçyiğit, B. Akkaya. – DOI 10.5296/bms.v11i1.16867 // Business Management and Strategy. – 2020. – Vol. 11, No. 1. – Pp. 110-123. – URL: <http://www.macrothink.org/journal/index.php/bms/article/view/16867> (дата обращения: 02.09.2020).
- [15] Sharifi, H. Agile manufacturing in practice-Application of a methodology / H. Sharifi, Z. Zhang. – DOI 10.1108/01443570110390462 // International Journal of Operations & Production Management. – 2001. – Vol. 21, No. 5-6. – Pp. 772-794.
- [16] Судаков, В. А. Решение задачи определения времени выполнения работы группой сотрудников с помощью нечетких множеств / В. А. Судаков, Ю. П. Титов. – DOI 10.21686/1818-4243-2019-5-74-82 // Открытое образование. – 2019. – Т. 23, № 5. – С. 74-82. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42440832> (дата обращения: 02.09.2020). – Рез. англ.
- [17] Colorni, A. Distributed Optimization by Ant Colonies / A. Colorni, M. Dorigo, V. Maniezzo // Proceedings of the First European Conference on Artificial Life, ECAL'91. – Elsevier, Paris, France, 1991. – Pp. 134-142.
- [18] Dorigo, M. Ant colony optimization / M. Dorigo, M. Birattari, T. Stutzle. – DOI 10.1109/MCI.2006.329691 // IEEE Computational Intelligence Magazine. – 2006. – Vol. 1, No. 4. – Pp. 28-39. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4129846> (дата обращения: 02.09.2020).
- [19] Oliveira, S. Analysis of the population-based ant colony optimization algorithm for the TSP and the QAP / S. Oliveira, M. S. Hussin, A. Roli, M. Dorigo, T. Stützle. – DOI 10.1109/CEC.2017.7969511 // 2017 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC), San Sebastian, 2017. – Pp. 1734-1741. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7969511> (дата обращения: 02.09.2020).
- [20] Pei, Y. Basic Ant Colony Optimization / Y. Pei, W. Wang, S. Zhang. – DOI 10.1109/ICCSEE.2012.178 // 2012 International Conference on Computer Science and Electronics Engineering, Hangzhou, 2012. – Pp. 665-667. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6187866> (дата обращения: 02.09.2020).
- [21] Судаков, В. А. Применение модифицированного метода муравьиных колоний для поиска рационального назначения сотрудников на задачи с применением нечетких множеств / В. А. Судаков, Ю. П. Титов. – DOI 10.21686/2500-3925-2020-3-79-91 // Статистика и Экономика. – 2020. – Т. 17, № 3. – С. 79-91. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43158708> (дата обращения: 02.09.2020). – Рез. англ.
- [22] Lootsma, F. A. Stochastic and fuzzy PERT / F. A. Lootsma. – DOI 10.1016/0377-2217(89)90211-7 // European Journal of Operational Research. – 1989. – Vol. 43, Issue 2. – Pp. 174-183. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0377221789902117> (дата обращения: 02.09.2020).
- [23] Sharafi, M. A Model for Project Scheduling with Fuzzy Precedence Links / M. Sharafi, F. Jolai, H. Iranmanesh, S. M. Hatefi // Australian Journal of Basic and Applied Sciences. – 2008. – Vol. 2, Issue 4. – Pp. 1356-1361. – URL: <http://www.ajbasweb.com/old/ajbas/2008/1356-1361.pdf> (дата обращения: 02.09.2020).
- [24] Toljaga-Nikolić, D. V. Application of fuzzy PERT method in project planning / D. V. Toljaga-Nikolić, D. Č. Petrović, M. M. Suknović, M. M. Mihić. – DOI 10.5937/tehnika1404679T // Technics. – 2014. – Vol. 69, Issue 4. – Pp. 679-686. – URL: <http://scindeks.ceon.rs/article.aspx?query=ISSID%26and%2612108&page=14&sort=8&stypre=0&bacskurl=%26issue.aspx%36issue%3d12108%26lang%3dsr&lang=sr> (дата обращения: 02.09.2020). – Рез. англ.
- [25] Thaeir Ahmed Saadoon Al Samman Fuzzy PERT For Project Management / Thaeir Ahmed Saadoon Al Samman, Ramadan M. Ramo Al Brahemi // International Journal of Advances in Engineering & Technology. – 2014. – Vol. 7, Issue 4. – Pp. 1150-1160. – URL: https://www.ijaet.org/media/4122-IJAET0722555_v7_iss4_1150-1160.pdf (дата обращения: 02.09.2020).
- [26] Liberatore, M. J. Critical Path Analysis With Fuzzy Activity Times / M. J. Liberatore. – DOI 10.1109/TEM.2008.919678 // IEEE Transactions on Engineering Management. – 2008. – Vol. 55, No. 2. – Pp. 329-337. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4494737> (дата обращения: 02.09.2020).
- [27] Титов, Ю. П. Модификации метода муравьиных колоний для разработки программного обеспечения решения задач многокритериального управления поставками / Ю. П. Титов. – DOI 10.25559/SITITO.2017.2.222 // Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2017. – Т. 13, № 2. – С. 64-74. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30258636> (дата обращения: 02.09.2020). – Рез. англ.

*Поступила 02.09.2020; принята к публикации 20.09.2020;
опубликована онлайн 30.09.2020.*

Об авторах:

Судаков Владимир Анатольевич, профессор департамента анализа данных и машинного обучения, ФГБОУ ВО «Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации» (125993, Россия, г. Москва, Ленинградский пр., д. 49), доктор технических наук, доцент, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1658-1941>, sudakov@ws-dss.com

Батьковский Александр Михайлович, советник генерального директора, ЦНИИ «Электроника» (127299, Россия, г. Москва, ул. Космонавта Волкова, д. 12), доктор экономических наук, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5145-5748>, batkovskiy_a@instel.ru

Титов Юрий Павлович, научный сотрудник Института проблем информатики Российской академии наук, ФГУ «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук» (119333, Россия, г. Москва, ул. Вавилова, д. 44, корп. 2), кандидат технических наук, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9093-6755>, kalengul@mail.ru

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



References

- [1] de la Garza J.M., Kim K. Application of the Resource-Constrained Critical Path Method to Multiple Calendars and Progressed Schedules. In: Ariaratnam S.T., Rojas E.M. (ed.) Building a Sustainable Future. *Proceedings of Construction Research Congress 2009*. American Society of Civil Engineers; 2009. p. 916-925. (In Eng.) DOI: [http://doi.org/10.1061/41020\(339\)93](http://doi.org/10.1061/41020(339)93)
- [2] Kim K., de la Garza J.M. Critical Path Method with Multiple Calendars. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2005; 13(3):330-342. (In Eng.) DOI: [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2005\)131:3\(330\)](http://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2005)131:3(330))
- [3] Naili M., Naili M. Tari A. Uncertainty in the Pert's Critical Path. *International Journal of Science and Technology*. 2018; 4(1):1-9. (In Eng.) DOI: <http://doi.org/10.20319/mijst.2018.41.0109>
- [4] Bondarenko A.N., Shavrin A.V. PERT in project management. *Upravlenie Proektami I Programmami = Project Management Journal*. 2016; (1):68-78. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25441318> (accessed 02.09.2020). (In Russ., abstract in Eng.)
- [5] Wilson J.M. Gantt Charts: A Centenary Appreciation. *European Journal of Operational Research*. 2003; 149(2):430-437. (In Eng.) DOI: [http://doi.org/10.1016/S0377-2217\(02\)00769-5](http://doi.org/10.1016/S0377-2217(02)00769-5)
- [6] Chen S.P., Hsueh Y.J. A Simple Approach to Fuzzy Critical Path Analysis in Project Networks. *Applied Mathematical Modelling*. 2008; 32(7):1289-1297. (In Eng.) DOI: <http://doi.org/10.1016/j.apm.2007.04.009>
- [7] Liu S.T. Fuzzy Activity Times in Critical Path and Project Crashing Problems. *Cybernetics and Systems: An international Journal*. 2003; 34(2):161-172. (In Eng.) DOI: <http://doi.org/10.1080/01969720302865>
- [8] Popescu C.-C., Giuclea M. On Critical Path with Fuzzy Weights. *Economic Computation and Economic Cybernetics Studies and Research*. 2018; 52(4):49-60. (In Eng.) DOI: <http://doi.org/10.24818/18423264/52.4.18.04>
- [9] Shih P.C. Analysis of critical paths in a project network with fuzzy activity times. *European Journal of Operational Research*. 2007; 183(1):442-459. (In Eng.) DOI: <http://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.06.053>
- [10] Zieliński P. On computing the latest starting times and floats of activities in a network with imprecise durations. *Fuzzy Sets and Systems*. 2005; 150(1):53-76. (In Eng.) DOI: <http://doi.org/10.1016/j.fss.2004.08.007>
- [11] Nasution S.H. Fuzzy critical path method. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. 1994; 24(1):48-57. (In Eng.) DOI: <http://doi.org/10.1109/21.259685>
- [12] Chen C.-T., Huang S.-F. Applying fuzzy method for measuring criticality in project network. *Information Sciences*. 2007; 177(12):2448-2458. (In Eng.) DOI: <http://doi.org/10.1016/j.ins.2007.01.035>
- [13] Bushuyeva N., Bushuieva D., Bushuieva V. AGILE Leadership of Managing Innovation Projects. *Innovate Technologies & Scientific Solutions for Industries*. 2019; 4(10):77-84. (In Eng., abstract in Russ.) DOI: <http://doi.org/10.30837/2522-9818.2019.10.077>
- [14] Kocyigit Y., Akkaya B. The Role of Organizational Flexibility in Organizational Agility: A Research on SMEs. *Business Management and Strategy*. 2020; 11(1):110-123. (In Eng.) DOI: <http://doi.org/10.5296/bms.v11i1.16867>
- [15] Sharifi H., Zhang Z. Agile manufacturing in practice-Application of a methodology. *International Journal of Operations & Production Management*. 2001; 21(5-6):772-794. (In Eng.) DOI: <http://doi.org/10.1108/01443570110390462>
- [16] Sudakov V.A., Titov Yu.P. Solving the problem of determining the time of work by a group of employees using fuzzy sets. *Open Education*. 2019; 23(5):74-82. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <http://doi.org/10.21686/1818-4243-2019-5-74-82>
- [17] Colorni A., Dorigo M., Maniezzo V. Distributed Optimization by Ant Colonies. In: *Proceedings of the First European Conference on Artificial Life, ECAL'91*. Elsevier, Paris, France; 1991. p. 134-142. (In Eng.)
- [18] Dorigo M., Birattari M., Stutzle T. Ant colony optimization. *IEEE Computational Intelligence Magazine*. 2006; 1(4):28-39. (In Eng.) DOI: <http://doi.org/10.1109/MCI.2006.329691>
- [19] Oliveira S., Hussin M.S., Roli A., Dorigo M., Stutzle T. Analysis of the population-based ant colony optimization algorithm for the TSP and the QAP. In: *2017 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*. San Sebastian; 2017. p. 1734-1741. (In Eng.) DOI: <http://doi.org/10.1109/CEC.2017.7969511>
- [20] Pei Y., Wang W., Zhang S. Basic Ant Colony Optimization. In: *2012 International Conference on Computer Science and Electronics Engineering*. Hangzhou; 2012. p. 665-667. (In Eng.) DOI: <http://doi.org/10.1109/ICCSEE.2012.178>
- [21] Sudakov V.A., Titov Yu.P. Application of the Modified Method of Ant Colonies to Search for Rational Assignment of Employees to Tasks Using Fuzzy Sets. *Statistics and Economics*. 2020; 17(3):79-91. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <http://doi.org/10.21686/2500-3925-2020-3-79-91>
- [22] Lootsma F.A. Stochastic and fuzzy PERT. *European Journal of Operational Research*. 1989; 43(2):174-183. (In Eng.) DOI: [http://doi.org/10.1016/0377-2217\(89\)90211-7](http://doi.org/10.1016/0377-2217(89)90211-7)
- [23] Sharafi M., Jolai F., Iranmanesh H., Hatefi S.M. A Model for Project Scheduling with Fuzzy Precedence Links. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*. 2008; 2(4):1356-1361. Available at: <http://www.ajbasweb.com/old/ajbas/2008/1356-1361.pdf> (accessed 02.09.2020). (In Eng.)
- [24] Toljaga-Nikolić D.V., Petrović D.Č., Suknović M.M., Mihić M.M. Application of fuzzy PERT method in project planning. *Technics*. 2014; 69(4):679-686. (In Serbian, abstract in Eng.) DOI: <http://doi.org/10.5937/tehnika1404679T>
- [25] Thaeir Ahmed Saadoon Al Samman, Ramadan M. Ramo Al Brahemi. Fuzzy PERT For Project Management. *International Journal of Advances in Engineering & Technology*. 2014; 7(4):1150-1160. Available at: https://www.ijaet.org/media/4122-IJAET0722555_v7_iss4_1150-1160.pdf (accessed 02.09.2020). (In Eng.)
- [26] Liberatore M.J. Critical Path Analysis With Fuzzy Activity Times. *IEEE Transactions on Engineering Management*. 2008; 55(2):329-337. (In Eng.) DOI: <http://doi.org/10.1109/TEM.2008.919678>
- [27] Titov Yu.P. Modification of the Ant Colony Optimization for the Development of Software for Solving Multi-criterion Supply Management Problems. *Sovremennye informacionnye tehnologii i IT-obrazovanie = Modern Information*



Technologies and IT-Education. 2017; 13(2):64-74. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <http://doi.org/10.25559/SITITO.2017.2.222>

*Submitted 02.09.2020; revised 20.09.2020;
published online 30.09.2020.*

About the authors:

Vladimir A. Sudakov, Professor of the Department of Data Analysis and Machine Learning, Financial University under the Government of the Russian Federation (49 Leningradsky Prospekt, Moscow 125993, Russia), Dr.Sci. (Engineering), Professor, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1658-1941>, sudakov@ws-dss.com

Alexander M. Batkovsky, Advisor to the General Director, CRI Electronics (12 Kosmonavta Volkova St., Moscow 127299, Russia), Dr.Sci. (Economy), ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5145-5748>, batkovskiy_a@instel.ru

Yuri P. Titov, Researcher of the Institute of Informatics Problems of the Russian Academy of Sciences, Federal Research Center "Computer Science and Control" of the Russian Academy of Sciences (44-2 Vavilova St., Moscow 119333, Russia), Ph.D. (Engineering), ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9093-6755>, kalengul@mail.ru

All authors have read and approved the final manuscript.

