

## Когнитивные информационные технологии в системах управления

УДК 004.942

**Титов Ю.П.**

Федеральный исследовательский центр «Информатика и Управление» РАН, Москва, Россия

### МОДИФИКАЦИИ МЕТОДА МУРАВЬИНЫХ КОЛОНИЙ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПОСТАВКАМИ

#### Аннотация

*В работе предложены три модификации метода муравьиных колоний, позволяющие находить многокритериальные решения для задачи поставки запасных частей авиационной техники. Особенностью модификаций является манипуляция весами критериев для управления перемещением муравьев. В результате достигается высокая сходимость алгоритма к решениям из множества Парето и возможность управления алгоритмом лицом, принимающим решения.*

#### Ключевые слова

*Метод муравьиных колоний; многокритериальная оптимизация; множество Парето; метод взвешенной суммы; управление поставками запасных частей.*

**Titov Yu.P.**

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

### MODIFICATION OF THE ANT COLONY OPTIMIZATION FOR THE DEVELOPMENT OF SOFTWARE FOR SOLVING MULTI-CRITERION SUPPLY MANAGEMENT PROBLEMS

#### Abstract

*The article proposes three modifications of the Ant Colony Optimization, for finding multi-criterion solutions for the task of supplying spare parts for aviation equipment. A peculiarity of modifications is the weights manipulation of the criteria for controlling the ants movement. As a result, we achieve rapid algorithm convergence to solutions from the Pareto set and the ability to control the algorithm by the decision maker.*

#### Keywords

*Ant Colony Optimization; Multi-criterion optimization; Pareto set; Weighted sum method; Supply management of spare parts.*

#### Введение

В современном мире множество исследований посвящено многокритериальной оптимизации. Большинство этих методов основываются на построении множества Парето [1,2] как области оптимальных решений. При этом выбор конкретного решения из множества Парето остается за лицом, принимающим решения (ЛПР). В случае большого числа (обычно больше 3-х) критериев встает проблема адекватной визуализации множества Парето для ЛПР. Кроме

того, во множество Парето могут входить тысячи или десятки тысяч альтернатив, что делает выбор одной из них очень непростой задачей. Для решения задач с большим количеством критериев применяют различные методы их свертки [3,4], обычно метод взвешенной суммы. Он позволяет достаточно просто вычислять взвешенный критерий и проводить оптимизацию, но он недостаточно «прозрачен» (т.е. по нему сложно сказать, почему оптимальной стала та или иная альтернатива) и сильно зависит от правильного

выбора весовых коэффициентов. Для устранения необходимости задания весов существуют другие свертки, например свертка Гермейера. Кроме различных сверток применяют методы сравнения альтернатив: метод парных сравнений, метод планомерного исключения альтернатив, метод идеальной точки, раскраска гиперкуба [2,5,6]. Данные методы более наглядны для ЛПР, но сильно зависят от размерности критериев и альтернатив.

Для решения проблем размерности ставится задача уменьшения количества рассматриваемых альтернатив, для которых вычисляются значения критериев. Решение данной задачи требуется, если вычисление значений критериев для каждой альтернативы требует достаточно сложных вычислений. Обычно в качестве таких методов выступают метаэвристические методы и эволюционные алгоритмы [7,8]: генетический метод, метод муравьиных колоний [9] и др. При этом генетические алгоритмы направлены на поиск наилучших «комбинаций» параметров в различных альтернативах, а метод муравьиных колоний нацелен на поиск наилучшего «направления» при выборе альтернативы. Для многокритериальной оптимизации в таких алгоритмах применяют метод взвешенной суммы для перехода к однокритериальной задаче [10] (во многом относится для алгоритма муравьиных колоний) или рассмотрение альтернатив только множества Парето [11] (во многом относится к генетическому алгоритму). Данные алгоритмы позволяют сократить количество перебираемых альтернатив, но не избавляются от недостатков алгоритмов принятия решений. Метод муравьиных колоний был выбран в силу возможности занесения феромона до начала его работы, тем самым позволяет сразу начать работу из множества рациональных решений.

В данной работе предлагается рассмотреть возможность модификации метода муравьиных колоний для целенаправленного поиска альтернативы с необходимыми рациональными параметрами. Для этого в начале работы предлагается специальная структура данных – «граф решений». Для нахождения решений на «графе решений» предложены следующие модификации метода муравьиных колоний:

- основанная на поиске с помощью взвешенной суммы критериев множества Парето;
- основанная на автоматическом определении весов критериев для каждого параметра и использовании полученных весов при поиске решения;
- работающая совместно с ЛПР и

последовательно производящая поиск необходимого для ЛПР решения.

Данные методы работают в дискретном множестве решений, каждое из которых называется альтернативой. В данной работе ограничимся декомпозируемым классом альтернатив, т.е. альтернативами, которые состоят из конечного множества выбираемых дискретных параметров.

### **Граф решений и формализация предлагаемой модификации метода муравьиных колоний**

В работе рассматриваются задачи, в которых каждая альтернатива может быть определена набором параметров, принимающих дискретные значения. Для каждого параметра должны быть заданы минимальное и максимальное значения. Примерами таких задач могут служить некоторые из задач управления, задачи планирования, например, задача составления заявки на закупку запасных частей.[12] Обычно в таких задачах выделяют два критерия: стоимость и эффективность, из которых вычисляют значение критерия эффективность-стоимость (чаще всего через операцию отношения) или один из критериев переводят в ограничения. Кроме того, в таких задачах имеется множество ограничений на используемые при выполнении заявки ресурсы, отличные от стоимостных.

В основу предлагаемых модификаций положен алгоритм муравьиных колоний для поиска пути коммивояжера на графе. Он легко приспособливается для решения других задач на графе, причем в ходе полученного решения не обязательно посещение всех вершин графа.[13] Для модификации метода муравьиных колоний к задачам поиска альтернатив с оптимальным набором параметров необходимо формализовать представление альтернатив и их параметров. Предлагается следующая структура графа решений (рис 1): каждый дискретный параметр (всего параметров  $n$ ) будет представлен набором вершин, однозначно определяющих значение параметра, параметры необходимо представить в виде последовательности. Из каждой вершины  $i$ -го параметра будет выходить дуга до каждой вершины  $i+1$  параметра, во все вершины 1-го параметра будет входить дуга из начальной вершины. В результате в «графе решений» будет существовать ограниченное число путей из начальной вершины до каждой вершины  $n$ -го параметра. Каждый путь будет точно определять значение каждого из параметров.

*Для определения решения на предлагаемом «графе решений» необходимо модифицировать метод муравьиных колоний.*

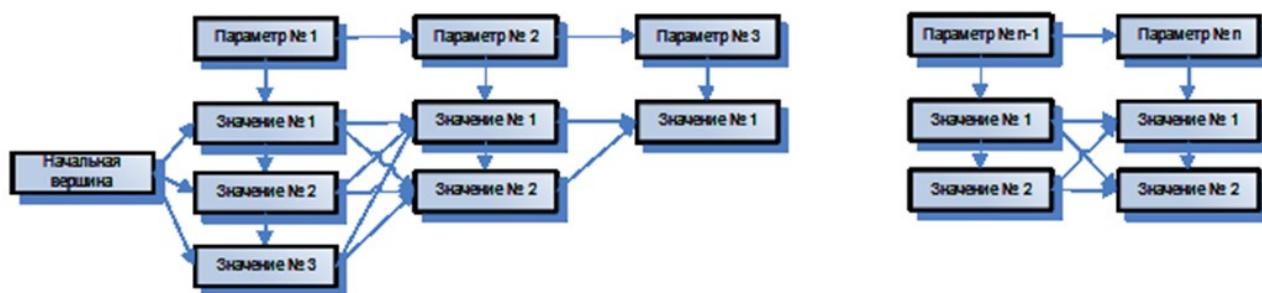


Рис 1. Структура «графа решений»

Начальной вершиной в модифицированном алгоритме для всех муравьев выберем начальную вершину «графа решений». Завершение процесса перемещения муравья заканчивается при достижении вершины последнего параметра из списка. После получения маршрута муравья и выбора набора значений каждого параметра необходимо проверить наличие альтернативы с данными параметрами или возможность ее существования (проверка ограничений). Основным источником информации в «графе решений» выступают вершины, так как именно от значений параметров альтернативы зависит ее рациональность, с точки зрения выбранных критериев. Поэтому предлагается заносить «феромон» на вершины, а не на дуги «графа решений».

Общей целью предлагаемых модификаций алгоритма является ускорение получения множества рациональных решений, множества Парето и др. Так как каждый муравей выбирает одно из решений, то целесообразно модифицировать поведение муравья. Для одномерной оптимизации обычно изменяют процесс занесения феромона на граф, а не процесс перемещения муравьев. Данный подход позволяет прогнозируемо улучшать алгоритм, т.е. при изменении процесса занесения феромона на граф, улучшения могут быть достаточно просто оценены и спрогнозированы. При многокритериальной оптимизации определение эффективного (с точки зрения каждого критерия) алгоритма занесения феромона на граф затруднительно, поэтому в работе предлагается модификация поведения муравьев в методе муравьиных колоний.

В случае многокритериальной оптимизации имеется векторная целевая функция, состоящая из значений критериев для каждой альтернативы. В результате существует проблема определения количества феромона (параметра дуги для метода муравьиных колоний), заносимого на все вершины «графа решений» муравьем после прохождения пути. Простое решение данной проблемы – это ввод вектора феромонов для каждой вершины. Размерность данного вектора определяется количеством критериев. Стоит отметить, что в процессе оптимизации можно столкнуться не только с минимизируемыми критериями, но и с

критериями, которые требуется максимизировать. Для минимизируемых критериев можно воспользоваться оригинальной формулой занесения феромона (1), а для максимизируемого критерия необходимо применять другие формулы. Если для максимизируемого критерия можно определить максимальное значение критерия, т.е. можно определить «идеальную точку», то можно воспользоваться формулой (2). Иначе придется воспользоваться формулой (3). Предложенные формулы позволяют обеспечить одинаковую процедуру определения количества феромона, заносимого на граф, для критериев, имеющих различное направление оптимизации.

$$q_{i,j,k} = \frac{Q_j}{w_{j,k}}, \quad (1)$$

$$q_{i,j,k} = \frac{Q_j}{Wm_j - w_{j,k}}, \quad (2)$$

$$q_{i,j,k} = Q_j * w_{j,k}, \quad (3)$$

где  $i$  – номер вершины «графа решений» из пути муравья  $i \in (1..n)$ ;  $n$  – число параметров;  $j$  – номер критерия  $j \in (1..m)$ ;  $m$  – число критериев;  $k$  – номер муравья;  $Q_{i,j,k}$  – количество феромона  $j$ -го типа, заносимого на  $i$ -ю вершины  $k$ -м муравьем;  $Q_j$  – параметр феромона для  $j$ -го критерия;  $w_{j,k}$  – значение  $j$ -го критерия вычисленное по альтернативе  $k$ -го муравья;  $Wm_j$  – «идеальная точка»  $j$ -го критерия, т.е. максимальное значение критерия.

Для сравнения модификаций алгоритмов приведем описание оригинального алгоритма (рис. 2). Основными изменяемыми процедурами в данном алгоритме являются: Определение распределения вероятностей перехода и Вычисление дуги, по которой будет перемещен муравей. Определение дуги, по которой будет перемещен муравей, предлагается реализовывать путем статистического моделирования дискретной скалярной случайной величины – Номер следующей вершины. Она задается с помощью ряда распределения, в котором для каждой следующей вершины определена вероятность перехода в нее. В результате моделирования необходимо получить реализацию случайной величины, т.е. номер следующей вершины.

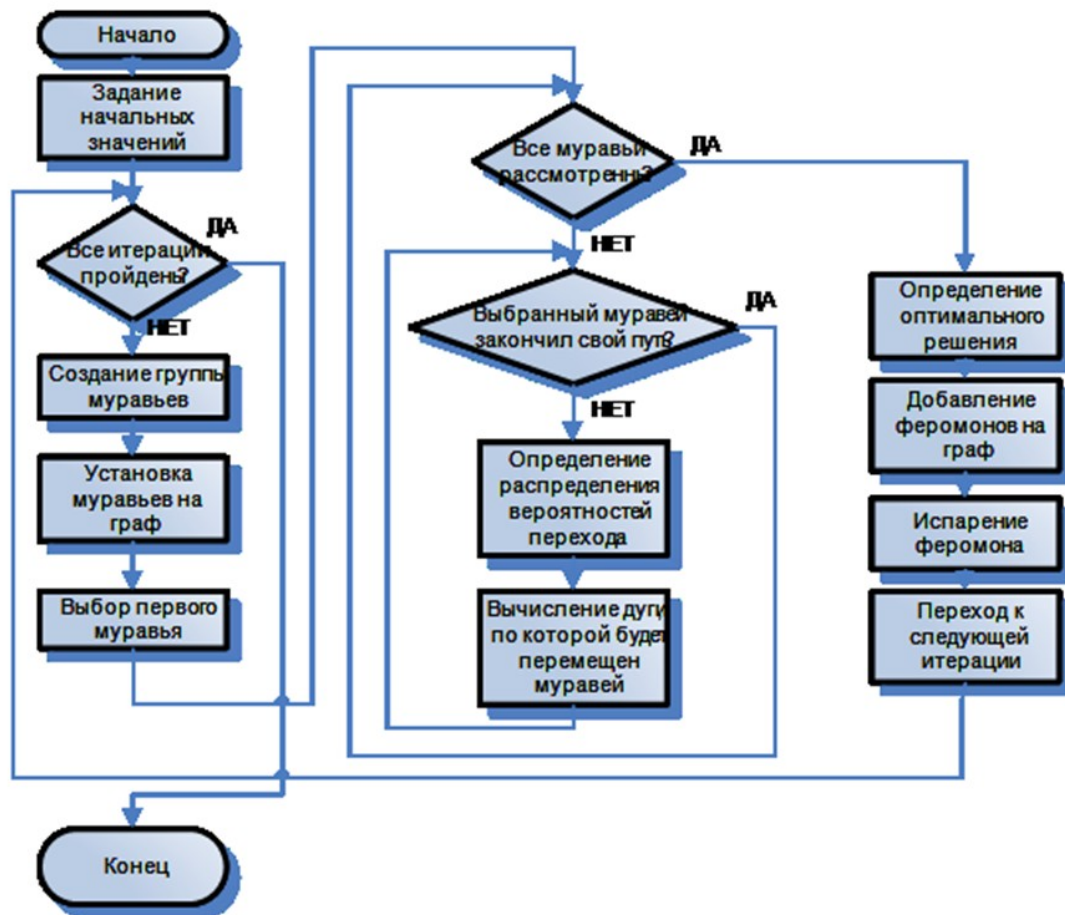


Рис 2. Описание алгоритма муравьиных колоний

Предлагаемые модификации будут изменять процедуру определения распределения вероятностей перехода, т.е. определять вероятности конкретных переходов для рассмотренной выше случайной величины.

### Модификация, основанная на поиске с помощью взвешенной суммы критериев множества Парето

Предлагается модификация алгоритма муравьиных колоний, позволяющая производить целенаправленный поиск «недостающих» решений из множества Парето. Примером поиска «недостающего» решения может служить поиск альтернативы в пространстве между двумя соседними решениями, входящими в множество Парето, например, 5-ой и 9-ой альтернативы (рис 3). Направление поиска задается с помощью назначения весов критериев.

При движении муравья можно использовать только один «тип феромона», т.е. в каждой вершине «графа решений» оперировать только одним типом весов из множества, тогда муравей будет стремиться найти решения, оптимальные по данному критерию. Если при выборе следующей вершины проводить свертку критерия (методом взвешенной суммы, сверткой Геймейера и др.), то муравьи, перемещающиеся по полученному в результате свертки обобщенному критерию, будут

искать решение, оптимизирующее (в случае метода муравьиных колоний — минимизирующее) данный критерий.

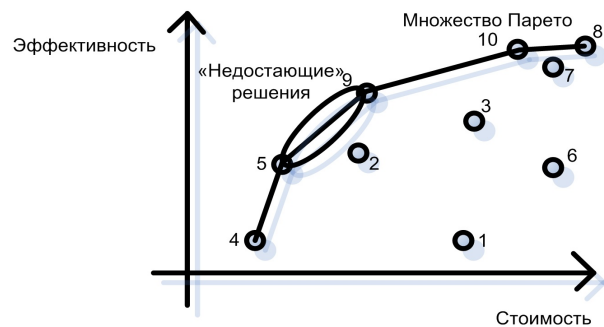


Рис 3. «Недостающее» решения

Для случая двух критериев, например, эффективность и стоимость, множество Парето, решения по каждому из критериев и по критерию взвешенной суммы (рис. 4). На рисунке представлены 10 альтернатив, расположенных по критериям эффективность и стоимость, множество Парето, линией отмечено направление оптимизации взвешенного критерия. Для взвешенного критерия наилучшей является альтернатива №5.

Из рисунка видно, что при использовании взвешенной суммы критериев вычисляется проекция всех решений на наклонную прямую.

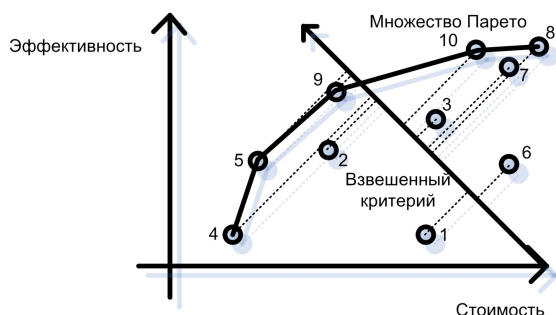


Рис 4. Множество Парето для критериев эффективность/стоимость

Путем изменения весов критериев можно изменять угол наклона прямой. Если в процессе работы метода муравьиных колоний постепенно изменять веса, можно рассмотреть все направления оптимизации. В таком случае вероятность перехода по дугам будет зависеть не только от количества феромона для конкретного критерия в вершинах следующего параметра, но и от «веса» этого критерия. Путем линейной комбинации значений феромона для критерия и их весов определяется значение взвешенного феромона для следующей вершины. Для задания вероятностей случайной величины «номер следующей вершины» необходимо провести нормализацию полученных значений взвешенного феромона:

$$p_{i1,i2,k} = \frac{\sum_{j=1}^m c_j * q_{i2,j}}{\sum_{i2=1}^m \sum_{j=1}^m c_j * q_{i2,j}}, \quad (4)$$

где  $k$  – номер муравья;  $i1$  – вершина «графа решений», в которой находится  $k$ -ый муравей  $i1 \in (1..Z_{i1})$ ;  $i2$  – вершина следующего параметра «графа решений»  $i2 \in (1..Z_{i2})$ ;  $Z_{i1}, Z_{i2}$  – количество вершин у параметра, в вершине которого находится  $k$ -ый муравей и следующего параметра соответственно;  $j$  – номер критерия  $j \in (1..m)$ ;  $m$  – число критериев;  $p_{i1,i2,k}$  – вероятность выбора  $k$ -м муравьем, находящимся в вершине  $i1$  следующей вершины с номером  $i2$ ;  $C_j$  – вес  $j$ -го критерия;  $q_{i2,j}$  – количество феромона, соответствующего  $j$ -му критерию в вершине  $i2$ .

Следует отметить отсутствие в формуле множителя, отвечающего за длину дуги (см. оригинальный алгоритм). Данное отсутствие вызвано невозможностью предсказания изменения значения критерия при выборе той или иной вершины.

Алгоритм изменится следующим образом (рис. 5): Необходимо добавить два внешних цикла, отвечающих за перебор критериев и значений «весов» для них. При этом необходимость в очистке «графа решений», т.е. обнуления феромона, отсутствует, так как параметры феромона зависят только от найденных решений, а

свертка (а только в ней применяются веса) производится только при выборе конкретной вершины.

**Модификация, основанная на автоматическом определении весов критериев для каждого параметра и поиска решений по данным весам**

Предлагается модификация алгоритма муравьиных колоний, определяющая веса критериев для каждого параметра отдельно. В результате имеется возможность определить влияние того или иного параметра на различные критерии. В зависимости от полученной степени влияния предлагается вычислять путь муравьев.

Основным недостатком предложенного в предыдущем пункте метода является экспоненциальный рост количества прогонов алгоритма муравьиных колоний с ростом числа критериев. Для решения данной проблемы предлагается отталкиваться не от конечного решения, а от параметров (в «графе решений» параметры представлены множеством вершин). Идея метода состоит в возможности разделения параметров по критериям. Например, в задаче расчета поставок запасных частей имеется возможность разделить параметры (конкретные названия запасных частей) по критериям эффективность и стоимость на дорогие и качественные детали, которые обеспечивают высокую надежность и дешевые, и менее качественные запасные части. В этом случае вариацию решений по конкретному критерию можно обеспечить соответствующей группой параметров. Но не всегда есть возможность однозначно определить разделение параметров на группы.

Если отказаться от строгого разделения параметров на группы по критериям, то можно для каждого параметра оценить его влияние на каждый критерий. Данную оценку в виде конкретного веса предлагается использовать для определения вероятностей с помощью формулы (4). Для определения веса критерия необходимо разделить количество феромона, соответствующего данному критерию в вершинах параметра, на общее количество феромона в вершинах:

$$c_{I2,j} = \frac{\sum_{i2=1}^{Z_{i2}} q_{i2,j}}{\sum_{j=1}^m \sum_{i2=1}^{Z_{i2}} q_{i2,j}}, \quad (5)$$

где  $i2$  – вершина следующего параметра ( $I2$ ) «графа решений»  $i2 \in (1..Z_{i2})$ ;  $Z_{i2}$  – количество вершин у следующего параметра;  $j$  – номер критерия  $j \in (1..m)$ ;  $m$  – число критериев;  $C_{I2,j}$  – вес  $j$ -го критерия для  $I2$ -го параметра;  $q_{i2,j}$  – количество феромона, соответствующего  $j$ -му критерию в вершине  $i2$ .

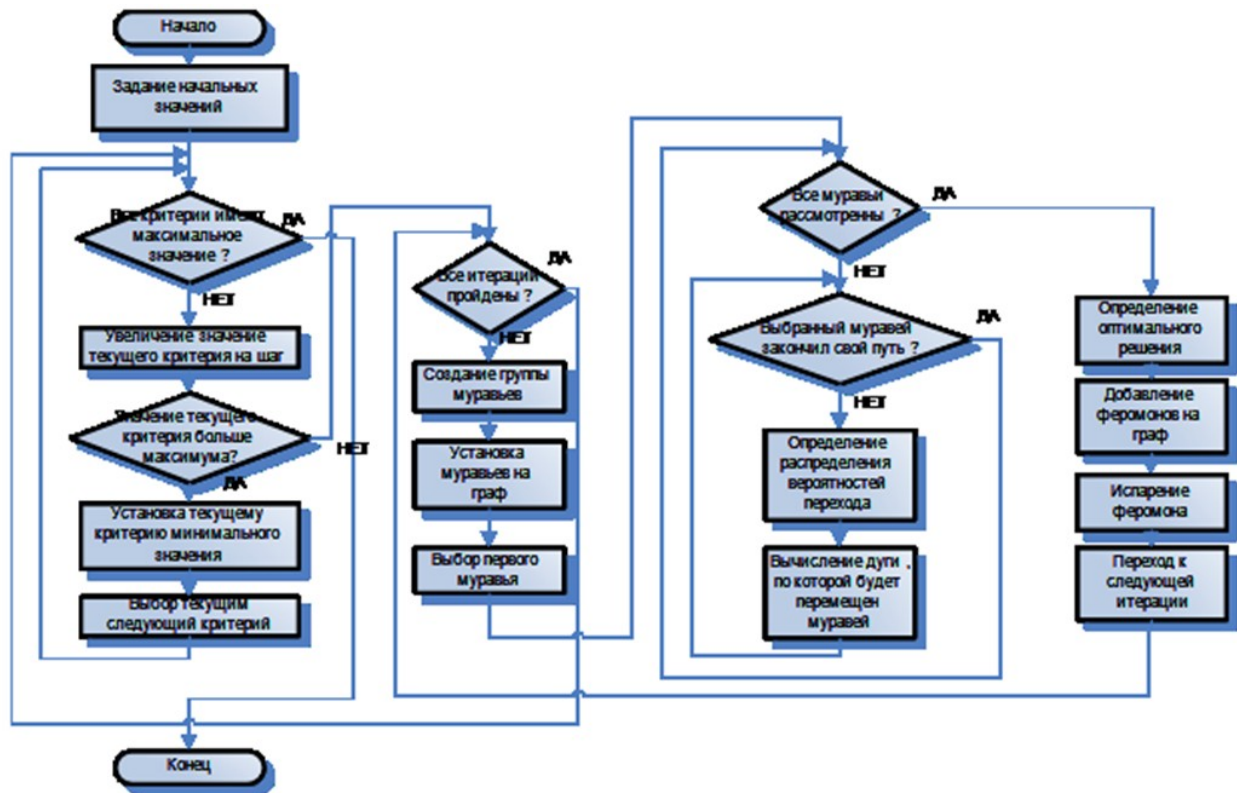


Рис 5. Описание модификации алгоритма муравьиных колоний, основанного на поиске с помощью взвешенной суммы критериев множества Парето

Так как феромон для каждого решения заносится на все вершины пути в одинаковом количестве и для определения пути нужно посетить ровно одну вершину каждого параметра, то общее количество феромона для каждого критерия для различных параметров будет одинаково. В результате веса критериев для различных параметров будут одинаковыми.

Алгоритм изменится следующим образом: после занесения феромона на граф необходимо вычислить параметры весов критериев в вершинах, а при определении распределения вероятностей перехода учесть данные веса.

Очевидным недостатком предложенного метода является неравнозначность отдельных вершин параметра в процессе определения результирующего веса параметра. Вершины, имеющие больше феромона, будут иметь больше влияния на веса. Для устранения данной проблемы следует немного изменить формулу вычисления весов параметра так, чтобы использовать не абсолютное количество феромона, а относительное для каждой вершины «графа решений». Для этого вместо суммы количества феромона вычисляется сумма отношений феромона для критерия к общему количеству феромона в вершине. При этом для нормировки весов необходимо полученную сумму разделить на количество вершин у параметра

$$c_{i2,j} = \frac{\sum_{i2=1}^{Z_2} \sum_{j=1}^m q_{i2,j}}{Z_2} \quad (6)$$

В предлагаемой формуле на веса параметра влияют не количество феромона на вершинах, а его отношение. В результате каждая вершина параметра с одинаковым весом влияет на распределение весов критериев. Но если количество вершин у параметра велико, то веса критериев в вершине долгое время будут одинаковыми.

Решением данной проблемы может служить учет количества проходов через вершину. Первоначально каждая вершина будет иметь количество проходов равное 1 и веса параметров для всех критериев будут одинаковыми. В ходе работы алгоритма в каждой вершине «графа решений» будут изменяться параметры вектора феромона и количество муравьев, посетивших данную вершину. Чтобы уменьшить степень влияния количества проходов через вершины можно использовать степенной коэффициент. Для вычисления веса критерия в вершине необходимо вычислить линейную комбинацию отношения количества феромона для выбранного критерия к общему количеству феромона в вершине и количества посещений вершины. После вычисления весов критериев для параметра необходимо провести операцию нормировки

$$C_{I2,j} = \frac{\sum_{i2=1}^{Z_{i2}} \left( \frac{Kol_{i2}^d * q_{i2,j}}{\sum_{j=1}^m q_{i2,j}} \right)}{\sum_{j=1}^m \sum_{i2=1}^{Z_{i2}} \left( \frac{Kol_{i2}^d * q_{i2,j}}{\sum_{j=1}^m q_{i2,j}} \right)}, \quad (7)$$

$$P_{i1,i2,k} = \frac{\sum_{j=1}^m C_{I2,j} * q_{i2,j}}{\sum_{i2=1}^{Z_{i2}} \sum_{j=1}^m C_{I2,j} * q_{i2,j}}, \quad (8)$$

где  $k$  – номер муравья;  $i1$  – вершина «графа решений», в которой находится  $k$ -ый муравей  $i1 \in (1..Z_{i1})$ ;  $i2$  – вершина следующего параметра ( $I2$ ) «графа решений»  $i2 \in (1..Z_{i2})$ ;  $Z_{i1}, Z_{i2}$  – количество вершин у параметра, в вершине которого находится  $k$ -ый муравей и следующего параметра соответственно;  $j$  – номер критерия  $j \in (1..m)$ ;  $m$  – число критериев;  $P_{i1,i2,k}$  – вероятность выбора  $k$ -м муравьем, находящимся в вершине  $i1$  следующей вершины с номером  $i2$ ;  $C_{I2,j}$  – вес  $j$ -го критерия для  $I2$ -го параметра;  $q_{i2,j}$  – количество феромона, соответствующего  $j$ -му критерию в вершине  $i2$ ;  $Kol_{i2}$  – количество прохождений муравьями через вершину  $i2$ ;  $d$  – степенной параметр ( $d < 1$ ).

#### Модификация, работающая совместно с ЛПР и последовательно производящая поиск необходимого для ЛПР решения

Предлагается модификация алгоритма муравьиных колоний, которая может работать совместно с ЛПР. Задачей данной модификации является быстрая подстройка алгоритма под поиск альтернатив при меняющихся ограничениях и предпочтениях ЛПР. В частности, рассматривается задача поиска альтернатив, которые могут улучшить выбранное ЛПР решение.

В задачах многокритериальной оптимизации предполагается участие ЛПР в конечном выборе альтернативы или непосредственном участии в процессе выбора. Учитывая данное замечание, можно отметить, что поиск всех альтернатив (при условии, что их много) из множества Парето является избыточным, так как ЛПР обычно интересуется сильно ограниченное множество решений из множества. Предлагается последовательный, итеративный метод муравьиных колоний для многокритериальной оптимизации. Обычно ЛПР хочет улучшить выбранную им альтернативу по одному или нескольким (может и по всем сразу) критериям или рассмотреть альтернативы в окрестности (которые немного хуже по одним критериям, но лучше по другим) выбранной. В результате можно перезапустить алгоритм муравьиных колоний для поиска решений только в области выбранной ЛПР

альтернативы.

Одним из вариантов осуществления данного вида поиска является вычисление весовых коэффициентов критериев (9) для выбранной ЛПР альтернативы и запуск метода муравьиных колоний для оптимизации взвешенной суммы критериев, с применением весов в формуле (4). Нетрудно доказать что выбранная ЛПР альтернатива будет иметь наилучшее значение полученной взвешенной суммы критериев среди рассмотренных алгоритмом альтернатив. (Предполагается, что ЛПР выбирает альтернативу из множества Парето). Любая альтернатива, превосходящая выбранную ЛПР по взвешенному критерию, будет предпочтительнее. Для определения веса критерия необходимо определить отношение значения критерия для выбранной альтернативы к максимальному значению данного критерия. После вычисления весов всех критериев необходимо провести операцию нормировки для них.

$$c_j = \frac{\frac{Kr_{j,vLPR} - \min_v Kr_{j,v}}{\max_v Kr_{j,v} - \min_v Kr_{j,v}}}{\sum_{j=1}^m \frac{Kr_{j,vLPR} - \min_v Kr_{j,v}}{\max_v Kr_{j,v} - \min_v Kr_{j,v}}}, \quad (9)$$

где  $j$  – номер критерия  $j \in (1..m)$ ;  $m$  – число критериев;  $vLPR$  – номер альтернативы, выбранной ЛПР;  $v$  – номер альтернативы;  $c_j$  – значение веса  $j$ -го критерия;  $Kr_{j,v}$  – значение  $j$ -го критерия для  $v$ -ой альтернативы.

При этом на «графе решений» целесообразно оставить феромон только на вершинах выбранной ЛПР альтернативы. Если при установленных ограничениях на значения критериев найденное в процессе работы алгоритма решение (новая альтернатива) им не удовлетворяет, то феромон на вершины не заносится.

#### Пример применения предлагаемых модификаций для решения задачи составления поставки запасных частей

Для примера возьмем задачу составления на заданный период времени поставки запасных частей для авиационной техники на этапе послепродажного обслуживания авиационной техники.[14] С помощью нормативных документов можно рассчитать состав заявки, т.е. количество запасных частей, которое должно обеспечить восстановление после отказов с достаточно высокой вероятностью. Но состав заявки, полученный таким образом, является избыточным и требует оптимизации.

Для примера рассмотрим задачу составления поставки запасных частей. Пусть для поставки рассматриваются 5 типов запасных частей для системы кондиционирования и регулирования давления ТУ-154 [15] и для каждого типа запасной

части определено максимальное количество, которое может потребоваться до следующей поставки. «Граф решений» для данной задачи представлен на рис 6. На графе имеются все дуги,

но для наглядности на рисунке отображены только дуги, идущие от вершин «Термореле 4463АТ-1» и «Регулятора избыточного давления 4561».

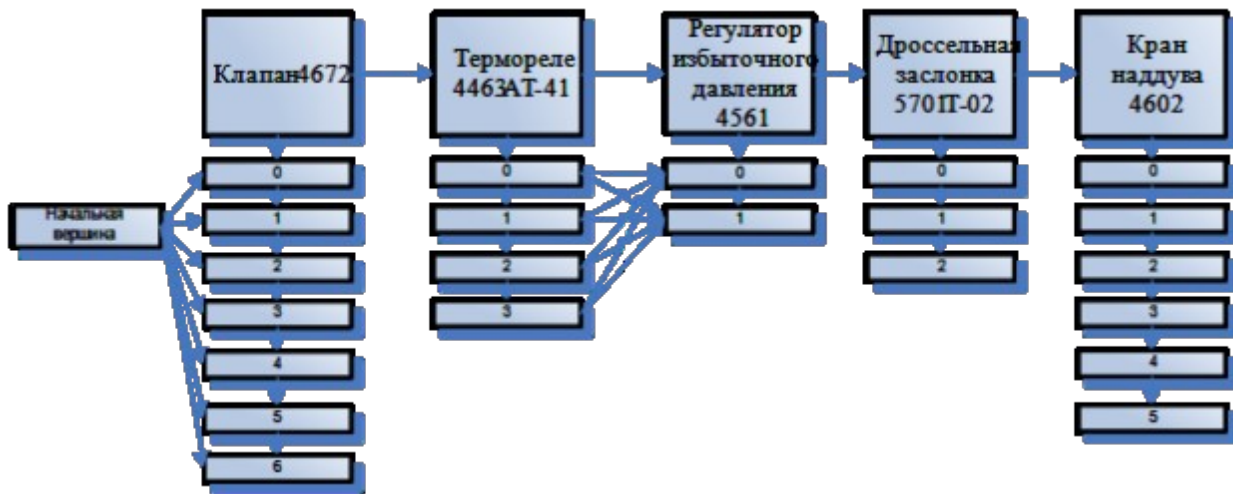


Рис 6. «Граф решений» для задачи определения состава поставки ЗЧ

Пусть в процессе работы модификации алгоритма муравьиных колоний имеется следующее состояние части «графа решений» (рис 7) и 7 решений, отмеченные на графике (рис 8). На рис 7 в каждой вершине отмечено количество феромона для критерия стоимости и критерия эффективности (отражает коэффициент готовности авиационной техники). Кроме того, вершины 0,1 и 2 для параметра «Дроссельная заслонка 5701Т-02» муравьи посетили 4,9 и 5 раз соответственно.

перехода муравья из вершины параметра «Регулятор избыточного давления 4561» с количеством 1 на следующие 3 вершины параметра «Дроссельная заслонка 5701Т-02». Покажем, как будут меняться вероятности перехода при использовании различных модификаций метода муравьиных колоний:

Рассмотрим модификацию метода муравьиных колоний, применяющую взвешенную сумму критериев с весами, заданными пользователем. Пусть весовые коэффициенты для критериев равны 0,35 и 0,65 для критерия стоимости и эффективности соответственно, тогда распределение вероятностей перехода в вершины параметра будет следующим:



Рис 7. Часть «графа решений»

$$P_{1,0,k} = \frac{0,35 * 100 + 0,65 * 20}{0,35 * 100 + 0,65 * 20 + 0,35 * 80 + 0,65 * 45 + 0,35 * 32 + 0,65 * 66} = \frac{48}{159,35} = 0,3,$$

$$P_{1,1,k} = \frac{0,35 * 80 + 0,65 * 45}{159,35} = \frac{57,25}{159,35} = 0,36,$$

$$P_{1,2,k} = \frac{0,35 * 32 + 0,65 * 66}{159,35} = \frac{54,1}{159,35} = 0,34.$$

Сумма вероятностей переходов равна 1, следовательно, события перехода в вершины образуют полную группу независимых событий – гипотез. Данные вероятности используются при моделировании случайной величины – Номер следующей вершины. На рис 8 отмечены 10 найденных в процессе поиска решения альтернатив и направление взвешенной суммы критериев, т.е. направление поиска альтернативы с наилучшим значением данного критерия. В данном примере для наглядности вместо критерия стоимость был выбран критерий «Максимальная стоимость - Стоимость». Из графика видно, что наилучшим решением является альтернатива №5.

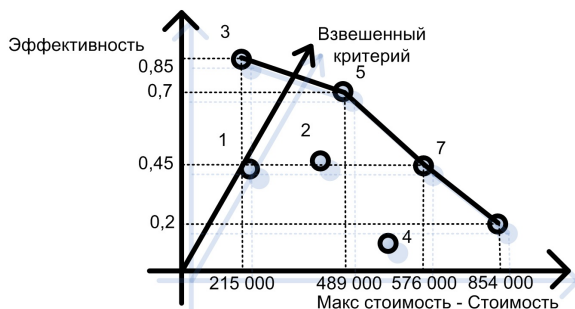


Рис 8. График с отображением альтернатив

Рассмотрим задачу определения вероятностей

Рассмотрим модификацию метода муравьиных колоний, вычисляющую веса критериев исходя из



количества феромонов в вершинах. При использовании абсолютных значений феромона веса критериев будут следующими:

$$C_{\text{Дроссельная заслонка 5701 Т-02, Стоимость}} = \frac{156+56+32}{100+80+32+20+45+66} = \frac{212}{343} = 0,618,$$

$$C_{\text{Дроссельная заслонка 5701 Т-02, Эффективность}} = \frac{20+45+66}{100+80+32+20+45+66} = \frac{131}{343} = 0,382.$$

Если вычислить веса критериев исходя из вершин, относящихся к параметру «Регулятор избыточного давления 4561», то они будут одинаковы:

$$C_{\text{Регулятор избыточного давления 4561, Стоимость}} = \frac{156+56}{156+56+50+81} = \frac{212}{343} = 0,618,$$

$$C_{\text{Регулятор избыточного давления 4561, Эффективность}} = \frac{50+81}{156+56+50+81} = \frac{131}{343} = 0,382.$$

Для данных весов вычисленные вероятности перехода из вершины параметра «Регулятор избыточного давления 4561» с количеством 1 на следующие 3 вершины параметра «Дроссельная заслонка 5701 Т-02» будут следующими:

$$P_{1,0,k} = \frac{0,618 * 100 + 0,382 * 20}{0,618 * 100 + 0,382 * 20 + 0,618 * 80 + 0,382 * 45 + 0,618 * 32 + 0,382 * 66} = \frac{69,44}{181,058} = 0,384,$$

$$P_{1,1,k} = \frac{0,618 * 80 + 0,382 * 45}{181,058} = \frac{66,63}{181,058} = 0,368,$$

$$P_{1,2,k} = \frac{0,618 * 32 + 0,382 * 66}{181,058} = \frac{44,988}{181,058} = 0,248.$$

Если применять относительное количество феромона в вершинах, то вычисленные веса критериев будут равны:

$$C_{\text{Дроссельная заслонка 5701 Т-02, Стоимость}} = \frac{100}{100+20} + \frac{80}{80+45} + \frac{32}{32+66} = \frac{0,833+0,64+0,326}{3} = 0,6,$$

$$C_{\text{Дроссельная заслонка 5701 Т-02, Эффективность}} = \frac{20}{100+20} + \frac{45}{80+45} + \frac{66}{32+66} = \frac{0,166+0,36+0,674}{3} = 0,4.$$

По полученным значениям весов вычислим вероятности переходов:

$$P_{1,0,k} = \frac{0,6 * 100 + 0,4 * 20}{0,6 * 100 + 0,4 * 20 + 0,6 * 80 + 0,4 * 45 + 0,6 * 32 + 0,4 * 66} = \frac{68}{179,6} = 0,379,$$

$$P_{1,1,k} = \frac{0,6 * 80 + 0,4 * 45}{179,6} = \frac{66}{179,6} = 0,367,$$

$$P_{1,2,k} = \frac{0,6 * 32 + 0,4 * 66}{179,6} = \frac{45,6}{179,6} = 0,254.$$

Следует показать, что веса критериев для разных параметров будут различаться. Вычислим значения весов критериев для вершины «Регулятор избыточного давления 4561».

$$C_{\text{Регулятор избыточного давления 4561, Стоимость}} = \frac{156}{156+56} + \frac{50}{50+81} = \frac{0,736+0,382}{2} = 0,559,$$

$$C_{\text{Регулятор избыточного давления 4561, Эффективность}} = \frac{56}{156+56} + \frac{81}{50+81} = \frac{0,441}{2} = 0,441.$$

Если учитывать количество прохождений муравьев через вершины «графа решений», то можно получить следующие веса критериев: (параметр  $p$  выберем равным  $1/2$ )

$$C_{\text{Дроссельная заслонка 5701 Т-02, Стоимость}} = \frac{100}{100+20} * 4^{1/2} + \frac{80}{80+45} * 9^{1/2} + \frac{32}{32+66} * 5^{1/2} = \frac{7,24}{7,24} = 1,$$

$$C_{\text{Дроссельная заслонка 5701 Т-02, Эффективность}} = \frac{0,833 * 2 + 0,64 * 3 + 0,326 * 2,24}{7,24} = \frac{4,32}{7,24} = 0,6,$$

$$C_{\text{Дроссельная заслонка 5701 Т-02, Эффективность}} = \frac{20}{100+20} * 4^{1/2} + \frac{45}{80+45} * 9^{1/2} + \frac{66}{32+66} * 5^{1/2} = \frac{7,24}{7,24} = 1,$$

$$C_{\text{Дроссельная заслонка 5701 Т-02, Эффективность}} = \frac{0,166 * 2 + 0,36 * 3 + 0,674 * 2,24}{7,24} = \frac{2,92}{7,24} = 0,4.$$

Так как в ходе решения веса получились равные весам, рассчитанным по относительному количеству феромона, то и вероятности перехода тоже будут одинаковыми.

Рассмотрим модификацию метода муравьиных колоний, работающую совместно с ЛПР и вычисляющую веса критериев исходя из выбранного ЛПР решения

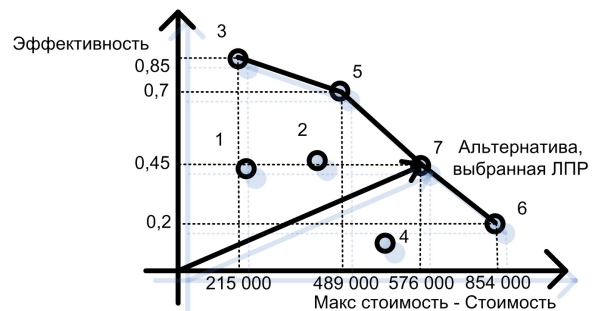


Рис 9. Определение весов для выбранной ЛПР альтернативы

Пусть для примера на рис 8. ЛПР выбрал вершину №7 (рис 9), тогда будут вычислены следующие веса для взвешенной суммы критериев:

$$C_{\text{стоимость}} = \frac{576 - 215}{854 - 215} + \frac{0,45 - 0}{0,85 - 0} = \frac{361}{639} + \frac{0,45 - 0}{1,094} = \frac{0,565}{1,094} = 0,5165,$$

$$C_{\text{эффективность}} = \frac{0,85 - 0}{1,094} = \frac{0,529}{1,094} = 0,4835.$$

### Заключение

В данной работе предложены модификации метода муравьиных колоний, позволяющие искать рациональные многокритериальные решения для задач, представление которых возможно с помощью «графа решений». В основе большинства методов лежит метод взвешенной суммы. Среди модификаций была сделана попытка устранить основной недостаток метода взвешенной суммы – сложность определения весов. Во многом этот недостаток удалось устранить. Основным недостатком предложенных модификаций является очень быстрая сходимость к определенному решению, т.е. предложенные модификации уменьшают число рассматриваемых решений путем усиления влияния феромона на выбираемый путь. Кроме того, была предложена модификация алгоритма, позволяющая в интерактивном режиме взаимодействовать с лицом, принимающим решения.

Для реализации предложенных модификаций разработано алгоритмическое и программное

обеспечение в среде программирования Borland Delphi 7. Разработанное программное обеспечение предназначено для составления заявки на поставку запасных частей для авиационной техники на определенный период. Реализованы следующие основные программные модули: UGraphSolution – модуль, в котором реализованы процедуры работы с «графом решений», UAntColony – модуль, управляющий поведением муравьев, UAntColonyDSS – модуль работы с ЛПР и др. Предполагается дальнейшее развитие системы в направлении работы с ЛПР и интеграции с другими системами поддержки решений.

### Благодарности

Выражаю благодарность Синицыну Игорю Николаевичу за постановку задачи и поддержку исследований.

Полученные в статье результаты положены в основу инструментального программного модуля для экспресс-анализа и синтеза стохастических систем высокой доступности.

### Литература

1. Бомас В.В., Судаков В.А. Поддержка субъективных решений в многокритериальных задачах. – М.: Изд-во МАИ, 2011. 176с.
2. Бомас В.В., Судаков В.А., Афонин К.А. Поддержка принятия многокритериальных решений по предпочтениям пользователя. СППР DSS/UTES. – М.: Изд-во МАИ, 2006. 172с.
3. Павленко А.И. Формализация задач принятия решений и выбора: Учебное пособие. – М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2009. 88с.
4. Моор Д.А. Мухлисуллина Д. Т. Анализ эффективности различных сверток критериев оптимальности в задаче многокритериальной оптимизации. – Наука и образование: Электронное научно-техническое издание, 2010, №4. – С. 123-129.
5. Соболев И.М. Статников Р.Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями: Учебное пособие для ВУЗов. – М.: Дрофа, 2006. 175 с.
6. Ryu J.H. Pareto front approximation with adaptive weighted sum method in multiobjective simulation optimization / Ryu J.H., Kim S. // Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference (WSC), 2009, Austin, pp. 623-633.
7. Аверченков В.И., Казаков П.В. Эволюционное моделирование и его применение: монография. – Брянск: БГТУ, 2009.
8. Белецкая С.Ю., Асанов Ю.А., Поваляев А.Д., Гаганов А.В. Исследование эффективности генетических алгоритмов многокритериальной оптимизации. – Вестник ВГТУ. 2015. №1. С 24-27.
9. A. Colorni, M. Dorigo, V. Maniezzo. Distributed optimization by ant colonies // Proceedings of the First European Conference on Artificial Life, ECAL'91. Elsevier, Paris, France, 1992. pp. 34–142.
10. Карпенко А. П., Чернобровченко К. А. Эффективность оптимизации методом непрерывно взаимодействующей колонии муравьев (СИАС). – Наука и Образование. Электронный журнал, №2 февраль 2011г. Открытый доступ (27,05,17 <http://technomag.edu.ru/>).
11. Ченгарь О.В. Адаптация концепции доминирования парето к методу муравьиных колоний. – Проблемы информационных технологий 2014, №15. с. 211-216.
12. Ченгарь О.В. Разработка «направленного» муравьиного алгоритма для оптимизации производственного расписания. – Вестник Херсонского национального технического университета, г. Херсон, 2013 №1(46), с. 212-217.
13. Титов Ю.П. Модификации метода муравьиных колоний для решения задач разработки авиационных маршрутов. – Автоматика и телемеханика №3 (76) 2015г. Академиздатцентр «Наука» РАН, 2015 с. 108-124.
14. Синицын И.Н., Шаламов А.С. Лекции по теории систем интегрированной логистической поддержки. – М.: ТОРУС ПРЕСС, 2012. 624с.
15. Волошин Ф.А., Кузнецов А.Н. – Самолет Ту-154. Конструкция и техническое обслуживание. (Книга 2). 1975.

### References

1. Bomas V.V., Sudakov V.A. Podderzhka sub#ektivnyh reshenij v mnogokriterial'nyh zadachah. – M.: Izd-vo MAI, 2011. 176s.
2. Bomas V.V., Sudakov V.A., Afonin K.A. Podderzhka prinjatija mnogokriterial'nyh reshenij po predpochtenijam pol'zovatelja. SPPR DSS/UTES. – M.: Izd-vo MAI, 2006. 172s.
3. Pavlenko A.I. Formalizacija zadach prinjatija reshenij i vybora: Uchebnoe posobie. – M.: Izd-vo MAI-PRINT, 2009. 88s.
4. Moor D.A. Muhlisullina D. T. Analiz jeffektivnosti razlichnyh svertok kriteriev optimal'nosti v zadache mnogokriterial'noj optimizacii. – Nauka i obrazovanie: Jelektronnoe nauchno-tehnicheskoe izdanie, 2010, №4. – S. 123-129.
5. Sobol' I.M. Statnikov R.B. Vybora optimal'nyh parametrov v zadachah so mnogimi kriterijami: Uchebnoe posobie dlja VUZov. – M.: Drofa, 2006. 175 s.
6. Ryu J.H. Pareto front approximation with adaptive weighted sum method in multiobjective simulation optimization / Ryu J.H., Kim S. // Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference (WSC), 2009, Austin, pp. 623-633.
7. AVerchenkov V.I., Kazakov P.V. Jevoljucionnoe modelirovanie i ego primenenie: monografija. – Brjansk: BGTU, 2009.
8. Beleckaja S.Ju., Asanov Ju.A., Povaljaev A.D., Gaganov A.V. Issledovanie jeffektivnosti geneticheskikh algoritmov mnogokriterial'noj optimizacii. – Vestnik VGTU. 2015. №1. S 24-27.

9. A. Coloni, M. Dorigo, V. Maniezzo. Distributed optimization by ant colonies // Proceedings of the First European Conference on Artificial Life, ECAL'91. Elsevier, Paris, France, 1992. pp. 34–142.
10. Karpenko A. P., Chernobrivchenko K. A. Jefferktivnost' optimizacii metodom nepreryvno vzaimodejstvujushhej kolonii murav'ev (CIAC). – Nauka i Obrazovanie. Jelektronnyj zhurnal, №2 fevral' 2011g. Otkrytyj dostup (27,05,17 <http://technomag.edu.ru/>).
11. Chengar' O.V. Adaptacija koncepcii dominirovanija pareto k metodu murav'inyh kolonij. – Problemi informacijnih tehnologij 2014, №15. s. 211-216.
12. Chengar' O.V. Razrabotka «napravlenno» murav'inogo algoritma dlja optimizacii proizvodstvennogo raspisanija. – Vestnik Khersonskogo nacional'nogo tehničeskogo universiteta, g. Kherson, 2013 №1(46), s. 212-217.
13. Titov Ju.P. Modifikacii metoda murav'inyh kolonij dlja reshenija zadach razrabotki aviacionnyh marshrutov. – Avtomatika i telemekhanika №3 (76) 2015g. Akademizdatcentr «Nauka» RAN, 2015 s. 108-124.
14. Sinicyn I.N., Shalamov A.S. Lekcii po teorii sistem integrirovannoju logisticheskoju podderzhki. – M.: TORUS PRESS, 2012. 624s.
15. Voloshin F.A., Kuznecov A.N. – Samolet Tu-154. Konstrukcija i tehničeskoe obsluzhivanie. (Kniga 2). 1975.

Поступила: 15.06.2017

**Об авторе:**

**Титов Юрий Павлович**, кандидат технических наук, научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр «Информатика и Управление» РАН, [kalengul@mail.ru](mailto:kalengul@mail.ru).

**Note on the author:**

**Titov Yuri P.**, Candidate of technical sciences, research associate, Federal Research Center Computer Science and Control of the Russian Academy of Sciences, [kalengul@mail.ru](mailto:kalengul@mail.ru).