

УДК 004.021

ПАРЕТО-ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО РАСПИСАНИЯ НА ОСНОВЕ МЕТОДА МУРАВЬИНЫХ КОЛОНИЙ

Ю.А. Скобцов¹, О.В. Ченгарь²

¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия
ya_skobtsov@list.ru

² Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия
OVChengar@sevsu.ru

Аннотация

Для оптимизации работы автоматизированного технологического участка механообработки наряду с модифицированным муравьиным алгоритмом, разработана объектно-ориентированная модель организационно-технологического процесса загрузки оборудования, представляющая систему взаимодействующих классов её типовых компонентов. Объектная модель описывает структуру классов, составляющих систему производственного процесса, их атрибуты, операции, взаимосвязи с другими классами. Модель позволяет рассчитать значения целевой функции и оценить качество потенциальных решений. Впервые предложено использование муравьиных алгоритмов совместно с объектно-ориентированным имитационным моделированием для оптимизации производственного расписания. Каждый искусственный муравей находит потенциальное решение задачи. Концентрация искусственного феромона определяется качеством решения относительно используемых критериев оптимизации. Для искусственных муравьев предложены формулы расчёта концентрации феромона и определены правила перехода, которые управляют процессом поиска оптимального решения. Предложена многокритериальная оптимизация с адаптивными весами, где в процессе решения корректируются веса целевой функции. Рассмотрены варианты выбора критериев оптимальности: максимизация среднего коэффициента загрузки технологического оборудования, минимизация нарушения крайних сроков изготовления заказа при минимальной длительности цикла изготовления деталей, минимизация нарушения крайних сроков изготовления заказа при минимизации времени переналадок оборудования, минимизация нарушения крайних сроков изготовления заказа при минимальной длительности изготовления деталей и времени переналадок оборудования. Экспериментальные исследования выполнены для решения задачи двух и трёхкритериальной оптимизации на примере автоматизированного технологического комплекса механообработки.

Ключевые слова: производственное расписание, многокритериальная оптимизация, муравьиный алгоритм, автоматизированный машиностроительный комплекс, объектно-ориентированные модели.

Цитирование: Скобцов, Ю.А. Парето-оптимизация производственного расписания на основе метода муравьиных колоний / Ю.А. Скобцов, О.В. Ченгарь // Онтология проектирования. – 2018. – Т. 8, №3(29). – С.469-479. – DOI: 10.18287/2223-9537-2018-8-3-469-479.

Введение

В работе рассматривается задача многокритериальной оптимизации производственного расписания с помощью муравьиного алгоритма (МА) с адаптивными весами. Присущие МА свойства способствуют их эффективному применению при решении задач многокритериальной оптимизации, так как МА используют множество потенциальных решений – популяцию и глобальный поиск в нескольких направлениях [1-3]. Кроме этого, МА не предъявляют требований к виду целевых функций и ограничений. МА хорошо показали себя для решения за-

дач комбинаторной оптимизации, одной из которых является задача составления производственных расписаний технологического оборудования гибких производственных систем (ГПС) автоматизированного технологического комплекса (АТК) механообработки [4, 5]. Известны применения МА при решении задач как комбинаторной [6], так и численной [7] оптимизации.

Для оценки качества потенциальных решений в процессе поиска решений на основе МА используются объектно-ориентированные модели, которые описывают важнейшие характеристики систем и позволяют с приемлемой достоверностью проводить моделирование их функционирования. Многокритериальная оптимизация получила широкое применение при решении различных задач [8-10].

1 Производственное расписание

Задача синтеза расписания работы ГПС заключается в том, чтобы для производственного участка с заданным технологическим маршрутом составить порядок обработки деталей, учитывая ограничения реальных производственных ситуаций за данное время. Модель такого процесса удобно представить в виде ориентированного графа, построение которого эквивалентно определению чисел t_{ij} – моментов начала технологической операции O_{ij} . В статье совокупность чисел $\{t_{ij}\}$ ($i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m_i$), удовлетворяющая производственным условиям, называется расписанием работы ГПС или его графовой моделью $G(i)$, где i – тип детали, n – количество деталей, j – технологическая операция, m – количество технологических операций [1, 4, 5].

В МА каждый искусственный муравей находит своё потенциальное решение, концентрация искусственного феромона определяется качеством построенного решения в соответствии с используемыми формулами коррекции концентрации феромона. Важнейшими компонентами МА являются правила (и соответствующие формулы расчёта вероятностей) для выбора следующей вершины графа в процессе поиска решения, которые определяют последовательность рассмотрения потенциальных решений. Для адаптации МА к решению поставленной задачи необходимо выполнить следующую последовательность действий.

- 1) разработать схему представления потенциального решения.
- 2) определить правила коррекции концентрации искусственного феромона, учитывающие качество потенциального решения.
- 3) разработать глобальные эвристики для определения выбора дуги при поиске пути в графе.
- 4) определить локальную эвристику поведения муравья в виде вероятности перехода при построении решения.
- 5) определить инструмент проверки выполнимости потенциального решения с учётом ограничений задачи.
- 6) проверить адекватность модели.

2 Графоаналитическая модель

На основе разработанной графоаналитической модели (см. рисунок 1) построена объектно-ориентированная модель организационно-технологического процесса загрузки оборудования, которая представляет систему взаимодействующих классов её типовых компонентов. Эта модель описывает структуру классов, составляющих систему производственного процесса, их атрибуты, операции, взаимосвязи с другими классами.

В работе [1] рассмотрено построение графоаналитической модели $G=(V, D, P)$, где V – множество вершин, каждая из которых представляет позицию обработки деталей; D – множество дуг графа, представляющих время перехода от одной технологической операции на другую; P – матрица правил перехода, где каждой дуге $(i, j) \in D$ приписывается вес P_{ij} .

Представленная на рисунке 1 графоаналитическая модель предусматривает распределение оборудования по технологическим операциям согласно плану выпуска деталей, а также позволяет варьировать его количеством, в зависимости от исправности оборудования и плановых профилактических работ.

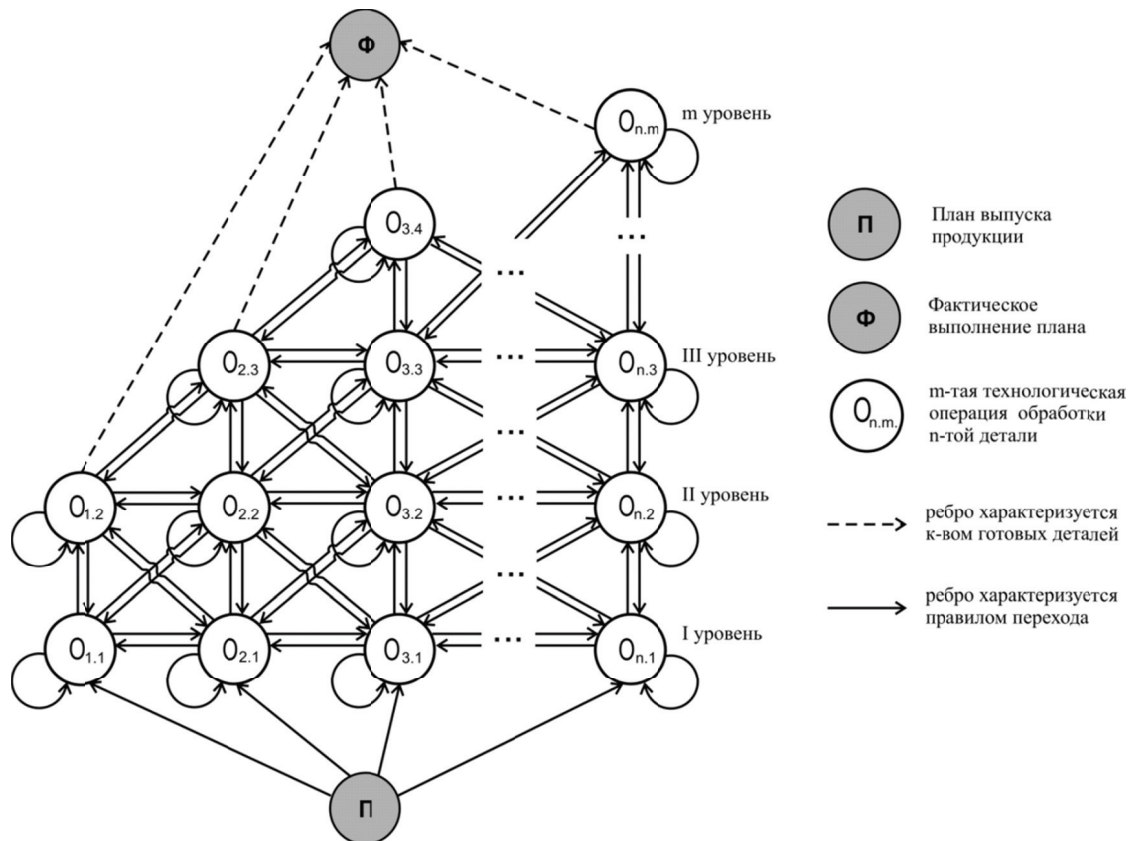


Рисунок 1 - Графоаналитическая модель организационно-технологического процесса загрузки гибких производственных модулей

Исходная вершина графа определяет начало выполнения плана производства (согласно производственной программе и технологическим картам изготовления деталей) – стартовую точку, которая характеризуется следующими параметрами:

$$(1) \quad \Pi = (Kv, D, Npl_i, Od_i, Rd_i, Ts_i),$$

где Kv – количество гибких производственных модулей (ГПМ) на производственном участке;

D – общее количество деталей d_i по производственной программе;

Npl_i – количество деталей i -того типа по производственной программе;

Od_i – количество операций O_{ij} , для изготовления детали i -того типа;

Rd_i – размер партии запуска деталей i -того типа;

Ts_i – срок изготовления партии деталей i -того типа.

Остальные вершины графа разбиты на уровни, каждый из которых соответствует отдельной технологической операции O_{ij} (согласно технологической карте). Каждая вершина O_{ij} однозначно определяется параметрами:

$$(2) \quad O_{ij} = (N_{ij}, n_{ij}, Tv_{ij}, Tn_{ij}, Tnp_{ij}, L1_{ij}, L2_{ij}, L3_{ij}),$$

где N_{ij} – номер ГПМ, на котором выполняется операция O_{ij} ;

n_{ij} – количество запущенных в обработку деталей d_i ;

Tv_{ij} – время выполнения технологической операции O_{ij} ;

Tn_{ij} – время наладки ГПМ для выполнения операции O_{ij} ;

Tnp_{ij} – время простоя ГПМ перед выполнением операции O_{ij} ;

$L1_{ij}$ – объём свободного места в лотке для заготовок;

$L2_{ij}$ – объём свободного места в лотке для готовой продукции;

$L3_{ij}$ – объём свободного места в лотке для инструментов.

Правило перехода ГПМ из стартовой точки в вершины первого уровня не является случайным событием, а рассчитывается с использованием временных параметров технологических карт изготовления деталей и с учетом сроков выполнения заказа:

$$(3) \quad P_{ij} = \frac{K_{ij}}{\sum K_{ij}}, \quad \sum P_{ij} = 1$$

где K_{ij} – коэффициент перехода:

$$(4) \quad K_{ij} = \frac{To_{ij} * kf}{Ts_i}$$

$$(5) \quad To_{ij} = \sum_{j=1}^m Tn_{ij} + Tv_{ij} * n_{ij},$$

где To_{ij} – время выполнения операции O_{ij} над партией деталей i -того типа;

kf – коэффициент возможности перехода.

$$(6) \quad Ts_i = k_i * dl,$$

где k_i – количество рабочих дней для выполнения заказа; dl – длительность рабочей смены, ч.

Время освобождения ГПМ из вершины рассчитывается с учётом величины максимальной партии запуска и временных параметров выполнения технологических операций:

$$(7) \quad Tсв_{ij} = L_{ij} * Tv_{ij} + Tn_{ij} + Tnp_{ij},$$

где L_{ij} – максимально допустимая партия запуска деталей d_i .

3 Направленный муравьиный алгоритм

Для оптимизации расписания производственного участка АТК предложен «направленный» МА, для которого: 1) разработана схема представления потенциального решения; 2) определены правила коррекции концентрации искусственного феромона, которые определяют положительную обратную связь; 3) разработана эвристика выбора дуги при поиске пути в графе; 4) определено «направленно-пропорциональное» правило перехода в следующую вершину графа; 5) выбраны «глобальные правила» для расчёта концентрации искусственного феромона, которые способствуют направленному поиску; 6) разработаны объектные модели для проверки выполнимости потенциального решения с учётом ограничений задачи; 7) произведена проверка адекватности предложенной модели.

Преимуществом разработанного алгоритма является то, что он не требует построения структурной модели самого производственного участка и допускает простые модификации, которые позволяют эффективно решать оптимизационные задачи подобного класса. Эта модификация отличается от [3] следующими особенностями:

1) Предложен метод вычисления вероятностей перехода искусственного муравья по вершинам графоаналитической модели, основанный на анализе текущей производственной ситуации; вероятность перехода k -того муравья в вершину O_{ij} определяется соотношением

$$(8) \quad \begin{cases} P_{ij,k}(t) = \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ij}(t)]^\beta}{\sum_{k=1}^1 [\tau_{ij}]^\alpha [\eta_{ij}(t)]^\beta}, & O_{ij} \in N_{ij}^k \\ P_{ij,k}(t) = 0, & O_{ij} \notin N_{ij}^k \end{cases},$$

где α – коэффициент, определяющий степень влияния феромона; β – коэффициент, определяющий влияние эвристической информации; τ_{ij} – концентрация феромона на дуге графа; η_{ij} – эвристическая информация (обычно, длина дуги); N_{ij}^k – перечень вершин графа O_{ij} , доступных для k -того муравья, t – номер итерации в процессе поиска решения.

2) Предпочтительность выбора вершины графа задаётся «направленно-пропорциональным» правилом перехода между вершинами, основанным на эвристической информации. Она определяется отношением времени выполнения технологической операции To_{ij} к запланированному времени изготовления детали Ts_i , которое в свою очередь корректируется после выполнения каждой технологической операции над партией деталей

$$(9) \quad \eta_{ij} = \frac{To_{ij}}{Ts_i}.$$

3) Для расчёта концентрации искусственного феромона при переходе муравья на следующий узел графа используются «глобальные» правила, которые способствуют направленному поиску. Эти правила заставляют муравьи двигаться в сторону найденных «худших» решений с целью их «улучшения». Такая стратегия стимулирует эксплуатацию пространства поиска и применяется после того, как решение построено, т.е. после прохождения всеми муравьями своего пути. В этом случае концентрацию феромона разрешается корректировать только «худшим» муравьям, построившим неоптимальный путь. Тогда для каждой дуги графа концентрация феромона корректируется в соответствии с правилом

$$(10) \quad \tau_{ij}(t+1) = \tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}(t), \Delta\tau_{ij}(t) = \sum_{k=1}^{n_k} \Delta\tau_{ij}^k(t),$$

где $\Delta\tau$ – количество искусственного феромона, откладываемое муравьями, определяется в зависимости от заданного критерия оптимальности и вычисляется по одному из следующих правил:

- для задачи максимизации среднего коэффициента загрузки оборудования

$$(11) \quad \Delta\tau_{ij}^k(t) = \frac{1}{\sum_{i,j} Tnp_{ij}^k},$$

где Tnp_{ij}^k – время простоя k -го оборудования перед выполнением операции O_{ij} ;

- для задачи минимизации времени переналадок оборудования

$$(12) \quad \Delta\tau_{ij}^k(t) = \frac{1}{\sum_{i,j} Tn_{ij}^k},$$

где Tn_{ij}^k – время наладки ГПМ для выполнения операции O_{ij} на k -ом оборудовании;

- для задачи минимизации длительности цикла изготовления деталей

$$(13) \quad \Delta\tau_{ij}^k(t) = \frac{1}{\sum_{i,j} \text{Тнр}_{ij}^k + \text{То}_{ij}^k},$$

где То_{ij} – времени выполнения технологической операции O_{ij} на k -ом оборудовании.

4 Парето-оптимизация производственного расписания на основе «направленного» муравьиного алгоритма

При использовании метода взвешенной функции для решения задач многокритериальной оптимизации «общая» целевая функция $F(x)$ строится из целевых функций $f_i(x)$ в виде их взвешенной суммы

$$(14) \quad F(x) = \sum_{i=1}^q w_i f_i(x).$$

Каждой целевой функции $f_i(x)$ присваивается свой вес w_i , и задача сводится к скалярному случаю. При этом различные веса w_i дают разные решения в смысле Парето. Скалярное значение общей целевой функции вычисляется путём суммирования взвешенных значений q критериев оптимальности. Для параллельного поиска кратных решений веса не фиксируются, что даёт возможность «направленному» МА расширять фронт по всем направлениям.

В предложенном алгоритме на каждой итерации по определённому критерию оптимизации формируется множество решений на основе «направленного» МА. Далее для исследуемых решений определяются максимальная и минимальная экстремальные точки в пространстве заданных критериев (Z). В итоге получаем гиперплоскость, которая определяется двумя экстремальными точками, и содержит все текущие решения, показанные на рисунке 2. Указанные две экстремальные точки обновляются на каждой итерации. При этом адаптивный вес k -ой цели определяется соотношением

$$(15) \quad w_k = \frac{1}{z_k^{\max} - z_k^{\min}}, \quad k = 1, 2, \dots, q.$$

Для каждой цели на основе выбранных критериев эффективности устанавливаются средневзвешенные весовые коэффициенты значимости, которые нормируются внутри группы.

$$(16) \quad w_k^{\text{норм.}} = \frac{w_k}{\sum_{i=1}^q w_i}, \quad k = 1, 2, \dots, q.$$

Тогда на каждой итерации взвешенная целевая функция определяется согласно следующему выражению

$$(17) \quad z(x) = \sum_{k=1}^q w_k^{\text{норм.}} (f_k(x) - z_k^{\min}).$$

Вначале алгоритма предполагается инициализация - обнуление всех значений Z_{\min} и Z_{\max} . Поскольку экстремальные точки обновляются на каждой итерации, то соответственно обновляются и веса.

В течение процесса поиска решения в пространстве z каждой популяцией муравьёв адаптивная гиперплоскость последовательно приближается к положительной (или отрицательной) идеальной точке (см. рисунок 2).

Поскольку для каждого из критериев оптимальности может быть задана своя точность решения, которая достигается при различных количествах итераций n_i , для их определения проведены экспериментальные исследования всех однокритериальных задач и определено количество итераций, при котором будет достигнута точность, соответствующая технологическим условиям. В качестве критерия останова при решении многокритериальной задачи выбирается максимальное значение количества итераций, полученной из решения однокритериальных задач.

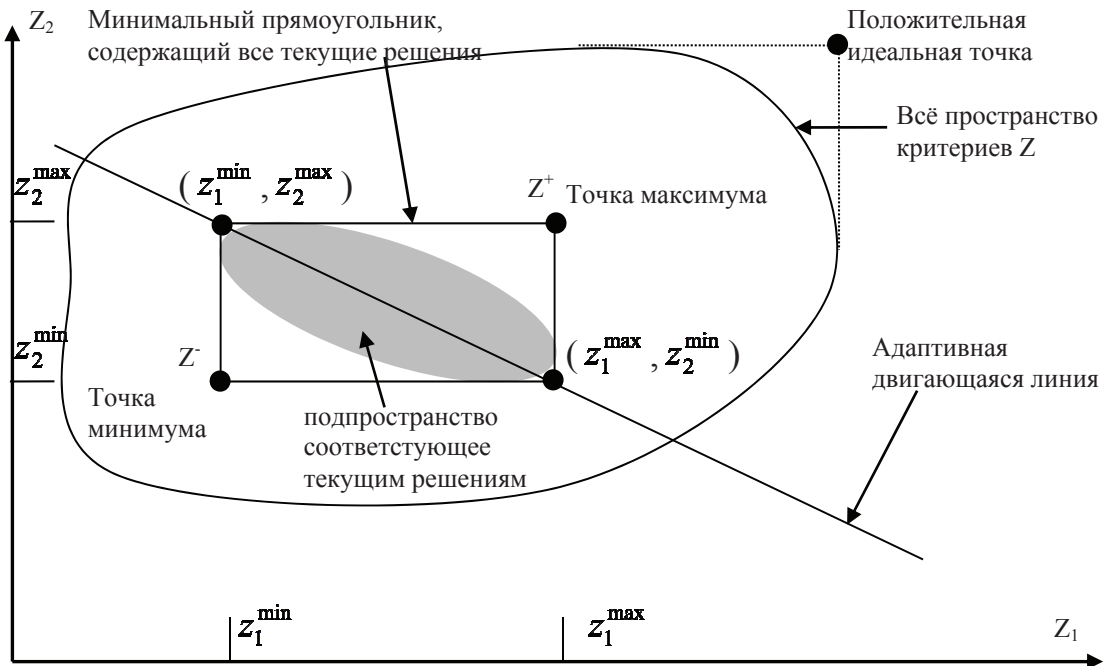


Рисунок 2 - Адаптивные веса и адаптивная гиперплоскость

Таким образом, описанный выше метод многокритериальной оптимизации позволяет перебирать всё пространство решений для каждой популяции муравьёв и выбирать из них пути, оптимальные в смысле Парето.

5 Экспериментальные исследования

В ходе эксперимента на объектной модели АТК решены многокритериальные задачи с применением «направленного» МА с адаптивными весами. Анализ результатов проводился по сравнению с решениями, полученными при решении однокритериальной задачи. Рассмотрим следующие варианты выбора критериев оптимальности.

I. Максимизация среднего коэффициента загрузки технологического оборудования.

II. Минимизация нарушения крайних сроков изготовления заказа при минимальной длительности цикла изготовления деталей.

III. Минимизация нарушения крайних сроков изготовления заказа при минимизации времени переналадок оборудования.

IV. Минимизация нарушения крайних сроков изготовления заказа при минимальной длительности изготовления деталей и времени переналадок оборудования.

Для проведения анализа полученных решений были рассмотрены зависимость среднего коэффициента загрузки технологического оборудования ($K_{зср}$) и времени нарушения крайних сроков заказа ($T_{ср}$) в зависимости от количества популяций муравьёв n_i для каждого из вари-

антов выбора критериев оптимальности. Отметим, что максимизация $K_{зср}$ включает в себя и минимизацию производственного цикла и настроек оборудования одновременно. Полученные результаты представлены на рисунках 3 и 4 соответственно.

Анализ полученных результатов показывает, что предложенный «направленный» МА с адаптивными весами для многокритериальной задачи требует большего количества итераций, чем подобный алгоритм для однокритериальной задачи. Причём с увеличением числа критериев увеличивается количество популяций муравьев для нахождения Парето-оптимального решения. Так, для однокритериальной задачи (I вариант) количество итераций, необходимое для достижения субоптимального решения, $n_t = 140$, для двухкритериальных задач (II и III варианты) $n_t = 190$, а для трёхкритериальной задачи (IV вариант) $n_t = 240$. Однако если предоставить «направленному» МА данное количество ресурса n_t , он неизменно показывает свою эффективность и позволяет получить «хорошие» решения.

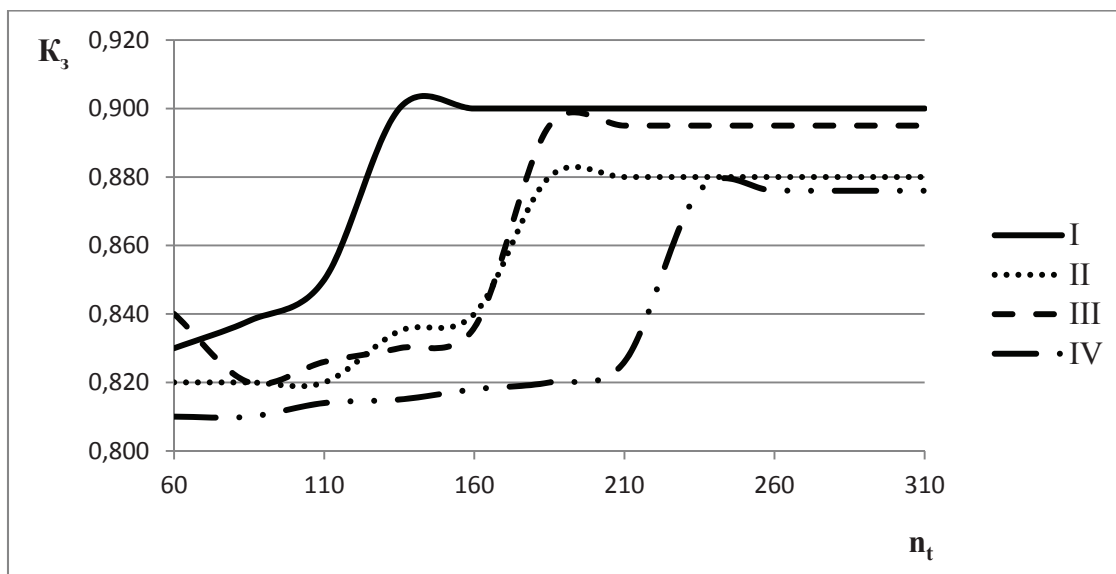


Рисунок 3 – Зависимость среднего коэффициента загрузки оборудования от количества итераций для различных вариантов выбора критериев оптимальности

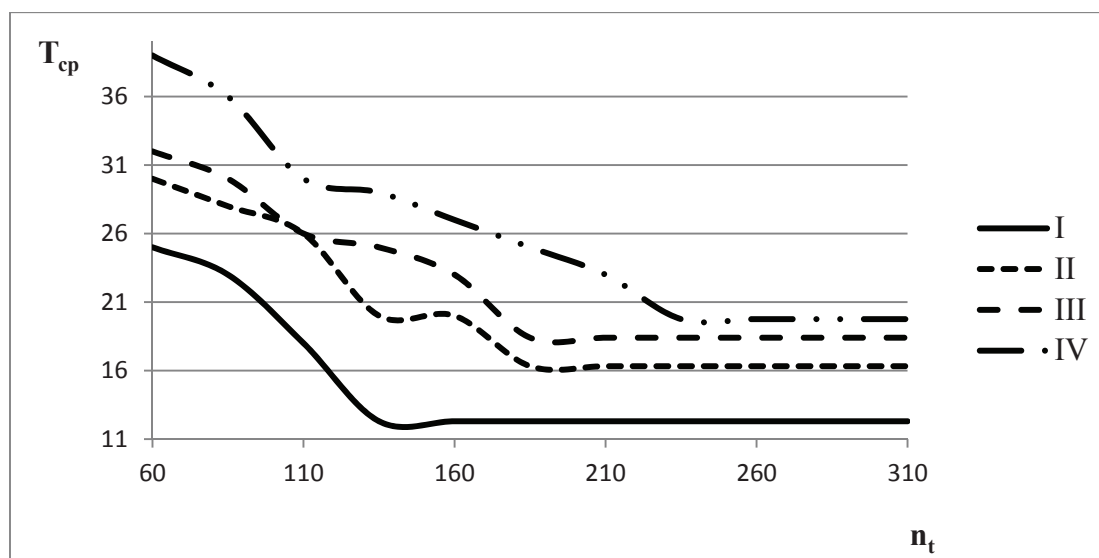


Рисунок 4 – Зависимость времени нарушения крайних сроков изготовления заказа от количества итераций для различных вариантов выбора критериев оптимальности

Заключение

Проведённые исследования основных временных параметров, полученных в результате решения задачи оптимизации производственного расписания, показали, что при введении дополнительных критериев эффективности задача выбора оптимальных решений значительно усложняется, однако эффективность методов существенно не снижается. Так, на рисунке 5 представлены диаграммы, отражающие разницу между значениями основных параметров, полученных путём однокритериальной и многокритериальной оптимизаций.

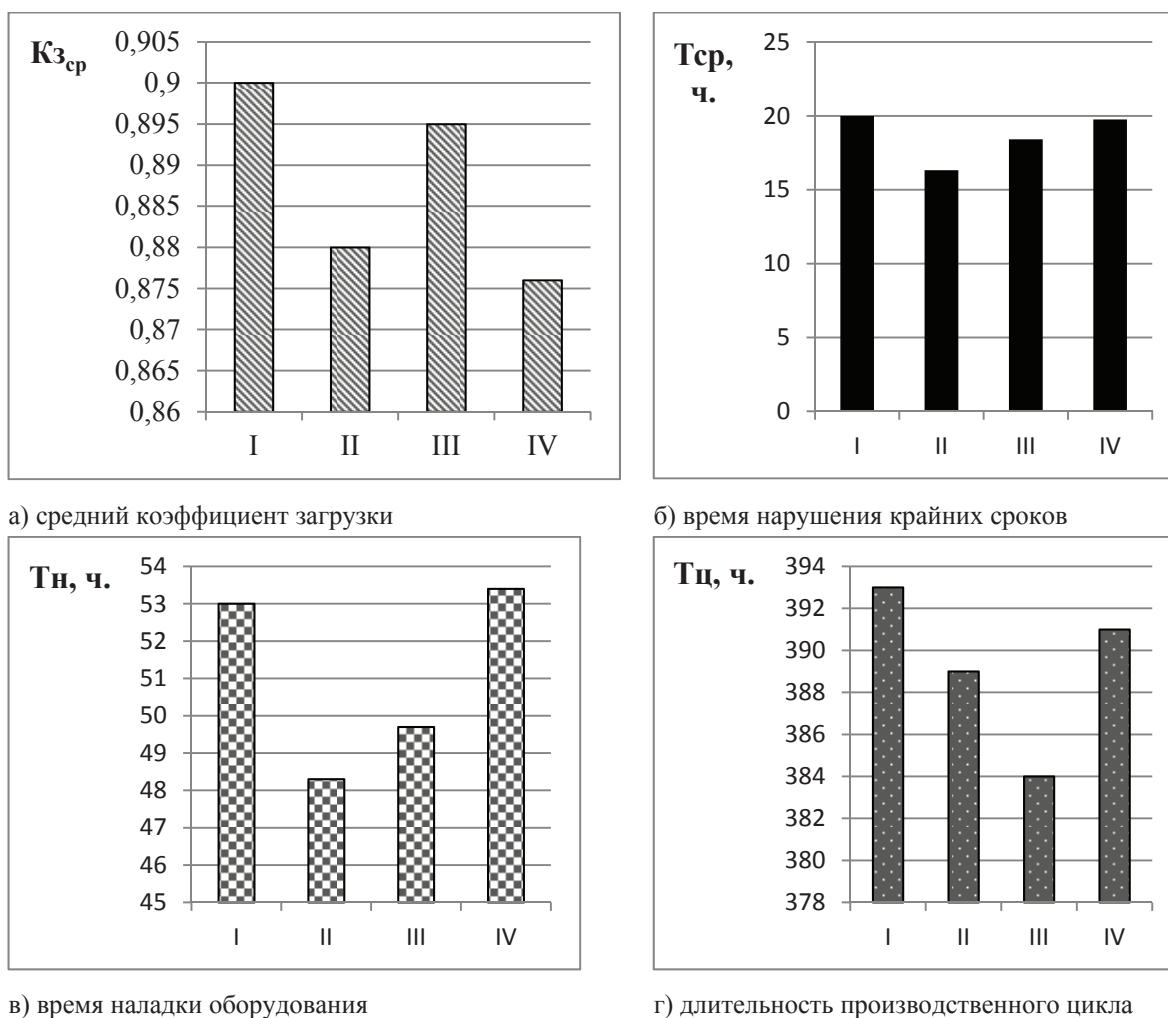


Рисунок 5 – Значения среднего коэффициента загрузки оборудования и временных параметров, полученных в результате оптимизации производственного расписания, в зависимости от варианта выбора критериев эффективности

Таким образом, можно сделать вывод о том, что применение метода Парето-оптимизации производственного расписания АТК на основе «направленного» МА с адаптивными весами для многокритериальной задачи позволяет получать результаты, в наименьшей степени отличающиеся от решения однокритериальной задачи. Т.е. при оптимизации одновременно по нескольким критериям, качество полученных решений по каждому критерию в отдельности значительно не снижается, что говорит о выборе верной тактики решения подобных задач.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Скобцов Ю.А.** Объектно-ориентированное моделирование и эволюционные алгоритмы / Ю.А. Скобцов А.И. Секирин С.Ю. Землянская О.В. Ченгарь В.Ю. Скобцов // Труды 7-й Всероссийской научно-практической конференции «Имитационное моделирование» (ИММОД-2015) // ISBN 978-5-91450-173-7 // Т.2.-М.: ИПУ РАН,2015. - С.338-343.
- [2] **Скобцов Ю.А.** Эволюционные вычисления: учебное пособие/ Ю.А Скобцов., Д.В. Сперанский. - М.: Национальный Открытый Университет «ИНТУИТ», 2015. - 331 с.
- [3] **Dorigo M.** Swarm Intelligence, Ant Algorithms and Ant Colony Optimization. Reader for CEU Summer University Course “Complex System”/ M. Dorigo. - Budapest, Central European University, 2001. - P.1–3.
- [4] **Скобцов Ю.А.** Многокритериальный муравьиный алгоритм оптимизации производственного расписания / Ю.А. Скобцов, О.В. Ченгарь, А.Н. Скаковская // Труды XXIX Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях - ММТТ-29». - СПб.: СПбГТИ(ТУ). Том.9. - С.245-253.
- [5] **Скобцов Ю.А.** Многокритериальные муравьиные алгоритмы и объектно-ориентированные модели / Ю.А. Скобцов, О.В. Ченгарь // Труды 8-й Всероссийской научно-практической конференции «Имитационное моделирование» (ИММОД -2017). - СПб.: СПИИРАН, 2017. - С.162-166.
- [6] **Курейчик В.М.** О некоторых модификациях муравьиного алгоритма / В.М. Курейчик, А.А. Кажаров // Известия ЮФУ. Технические науки». Тематич. выпуск «Интеллектуальные САПР». 2008, № 4(81) – 268 с.
- [7] **Карпенко А.П.** Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой / А.П. Карпенко. - Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014.-446с.
- [8] **Пиявский С.А.** Прогрессивность многокритериальных альтернатив / С.А. Пиявский // Онтология проектирования. - 2013. - №4(10). - С.53-59.
- [9] **Пиявский С.А.** Два новых понятия верхнего уровня в онтологии многокритериальной оптимизации / С.А. Пиявский // Онтология проектирования. – 2013. - №1(7). – С.65-85.
- [10] **Ларионов И.П.** Парето-оптимизация в области принятия решений при проектировании комплексной системы защиты предприятия/ И.П. Ларионов, П.Б. Хорев // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 8, №2 (2016). - <http://naukovedenie.ru/PDF/118TVN216.pdf>. - DOI: 10.15862/118TVN216.

PARETO-OPTIMIZATION OF THE PRODUCTION SCHEDULE BASED ON THE METHOD OF ANTS OF COLONIES

Y.A. Skobtsov¹, O.V. Chengar²

¹ *St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia, ya_skobtsov@list.ru*

² *Sevastopol State University, Sevastopol, Russia, OVChengar@sevsu.ru*

Abstract

To optimize the functioning of the automated machining technological complex together with a modified ant algorithm an object model of the organizational and technological process of loading equipment was developed, representing a system of interacting classes of its typical components. The object model describes the structure of the classes that make up the production process system, their attributes, operations, relationships with other classes. The model allows to calculate the values of the objective function and evaluate quality of potential solutions. For the first time, the use of ant algorithms in conjunction with object-oriented simulation modeling is proposed to optimize the production schedule. Every artificial ant finds a potential solution to the problem. The concentration of artificial pheromone is determined by the quality of the solution with respect to the optimization criteria used. For artificial ants formulas for calculating the concentration of pheromone are proposed and transition rules that control the process of searching for the optimal solution are defined. Multi criteria optimization with adaptive weights is proposed, where in the search process the weights of the objective function are corrected. The following variants of choosing the optimality criteria are considered: maximization of the average load factor of the process equipment, minimization of the violation of the deadlines for manufacturing the order with the minimum duration of the manufacturing cycle of the parts, minimization of the violation of the deadlines for the manufacture of the order, minimization of the time limits for manufacturing the order, and the time of adjustment of equipment. Experimental studies were performed to solve the problem of two and three-criteria optimization using the example of an automated technological complex for machining.

Key words: production schedule, multi-criteria optimization, ant algorithm, automated machine building complex, object-oriented models.

Citation: Skobtsov YA, Chengar OV. Pareto-Optimization of the production schedule based on the method of ants of colonies [In Russian]. *Ontology of designing*. 2018; 8(3): 469-479. DOI: 10.18287/2223-9537-2018-8-3-469-479.

References

- [1] *Skobtsov YA, Sekirin AI, Zemlyanskaya SY, Chengar OV, Skobtsov VY*. Object-oriented modeling and evolutionary algorithms [In Russian]: Proc. of the 7th Scientific and Practical Conference «Imitation Modeling» (IMMOD-2015) // ISBN 978-5-91450-173-7 // V.2. - Moscow: IPP RAS, 2015. - P.338-343.
- [2] *Skobtsov YA, Speransky DV*. Evolutionary computing: a tutorial [In Russian]. - Moscow: National Open University "INTUIT", 2015. – 331 p.
- [3] *Dorigo M*. Ant Algorithms Solve Difficult Optimization Problems. In: Kelemen J., Sosík P. (eds) *Advances in Artificial Life. ECAL 2001. Lecture Notes in Computer Science*, vol. 2159. Springer, Berlin, Heidelberg. – DOI: 10.1007/3-540-44811-X_2.
- [4] *Skobtsov YA, Chengar OV, Skakovskaya AN*. Multicriteria ant algorithm for optimization of production schedules [In Russian]: Proc. of the XXIX - International scientific conference "Mathematic methods in engineering and technology - MMET-29". - St. Petersburg: SPbGTI (TU). V.9. - P.245-253.
- [5] *Skobtsov YA, Chengar OV*. Multicriteria ant algorithms and object-oriented models [In Russian]: Proc. of the 8th Scientific and Practical Conference "Imitation Modeling" (IMMOD -2017). - St. Petersburg: SPIRAN, 2017. - P.162-166.
- [6] *Kureichik VM, Kajarov AA*. On some modifications of the ant algorithm [In Russian]: News of SFedU. Technical science". Thematic issue "Intellectual CAD". - Taganrog, 2008; 4(81) – 268 p.
- [7] *Karpenko AP*. Modern algorithms of search optimization. Algorithms inspired by nature [In Russian]. - Moscow: Pub.MSTU named after Bauman, 2014. – 446 p.
- [8] *Piyavsky SA*. Progressivity of multicriteria alternatives [In Russian]. *Ontology of designing*, 2013; 4(10): 53-59.
- [9] *Piyavsky SA*. Two new upper level concepts for the multi-criteria optimization ontology [In Russian]. *Ontology of designing*, 2013; 1(7): 65-85.
- [10] *Larionov IP, Khorev PB*. Pareto-optimization in the field of decision-making when designing an integrated system of enterprise protection [In Russian] / Internet-journal "Naukovedenie". 2016; 8(2). - <http://naukovedenie.ru/PDF/118TVN216.pdf>. - DOI: 10.15862/118TVN216.

Сведения об авторах



Скобцов Юрий Александрович, 1946 г. рождения. Окончил Московский физико-технический институт в 1971 г., д.т.н. (1994), профессор (2000). Профессор кафедры «Компьютерные технологии и программная инженерия» Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В списке научных трудов более 300 работ (включая 10 монографий и учебных пособий) в области искусственного интеллекта, объектно-ориентированного моделирования, эволюционных алгоритмов.

Yuri Alexandrovich Skobtsov (b. 1946). He graduated from the Moscow Institute of Physics and Technology in 1971, Doctor of Technical Sciences (1994), Professor (2000). Professor of the department "Computer Technologies and Software Engineering" of St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation. In the list of scientific works more than 300 scientific papers (including 10 monographs and textbooks) in the field of artificial intelligence, object-oriented

modeling, evolutionary algorithms.



Ченгарь Ольга Васильевна, 1977 г. рождения. Окончила Донецкий государственный технический университет в 1999 г., к.т.н. (2013). Доцент кафедры информационных технологий и компьютерных систем ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет». В списке научных трудов более 30 работ в области имитационного моделирования, искусственного интеллекта, биоинспирированных вычислений.

Olga Vasilievna Chengar (b. 1977). Graduated from Donetsk State Technical University in 1999, Ph.D. (2013). Associate Professor of the Department of Information Technologies and Computer Systems of the Federal State Unitary Enterprise "Sevastopol State University". In the list of scientific works more than 30 works in the field of imitation modeling, artificial intelligence, natural computing.