

УДК 004.942

О.В. Ченгарь

РАЗРАБОТКА «НАПРАВЛЕННОГО» МУРАВЬИНОГО АЛГОРИТМА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО РАСПИСАНИЯ

Введение. Вопросы оперативного планирования среднесерийного и мелкосерийного производства в машиностроительной отрасли, исследуются достаточно давно [1]. Все организационно-технологические решения должны приниматься оперативно, т.к. несвоевременные решения значительно снижают эффективность работы производственного участка.

В рамках оперативного управления одной из важнейших проблем является проблема планирования работы гибкой производственной системы (ГПС), т.е. упорядочение работ на выбранной структуре гибких производственных модулей (ГПМ) [2]. Особенностью производственной сферы является тот факт, что в процессе работы некоторые технологические машины могут выйти из строя или потребоваться их профилактический ремонт, вследствие этого необходимо иметь возможность динамически перераспределять нагрузки между оставшимся оборудованием, чтобы не останавливать все производство.

Существует множество работ посвященных проблеме оперативного управления в дискретных производствах. Разработаны и внедрены некоторые системы управления гибкими производственными системами (OmegaProduction, ФОБОС). В результате анализа существующих систем планирования выявлен ряд недостатков [3], для исключения которых целесообразно использовать эволюционные методы, которые разрешили бы получать оптимальные решения проблем реальных производственных ситуаций за малое время. При решении такие методы рассматривают систему планирования как черный ящик, когда на входе задаются разные значения параметров планирования, после чего оценивается эффективность получаемых расписаний с точки зрения ключевых показателей эффективности.

Постановка задачи исследования. Задача оперативного планирования работы ГПС заключается в том, чтобы для производственного участка с заданными технологическими маршрутами обработки деталей составить некоторое расписание, удовлетворяющее сформулированным условиям, которое представляется в виде графа. Бесспорно, построение такого графа эквивалентно определению чисел t_{ij} – моментов начала технологической операции O_{ij} . Совокупность чисел $\{t_{ij}\}$ ($i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m$), удовлетворяющая сформулированным условиям, называется расписанием работы ГПС, или его графовой моделью $G(i)$.

Очевидно, что существует бесчисленное множество графов, которые удовлетворяют сформулированным условиям и ограничениям. В работе [4] исследован вопрос разработки графоаналитической модели и построена графоаналитическая модель в соответствии с избранным критерием оптимизации. Здесь мы имеем естественное представление задачи в виде графа (1).

$$G=(V,D,P), \quad (1)$$

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} .

Для реализации алгоритма оптимизации производственного расписания была предложена объектная модель функционирования ГПС [5], которая позволяет наглядно отобразить его работу, все связи и последовательность функционирования. Объектная модель представляет собой описание объектов, составляющих в совокупности проектируемую систему, а также отображает различные зависимости между ними.

Основываясь на разработанных графоаналитической и объектной моделях, был предложен укрупненный алгоритм прохода одной популяции муравьев для имитационного моделирования производственного процесса в ГПС [6]. Данный алгоритм учитывает различные внешние воздействия, такие как поломка ГПМ, выполнение плановых ремонтных работ, наладка оборудования, задержка в поставках материалов и прочее, а также наличие в ГПС транспортного и складского оборудования. Так при составлении расписания моделируется время начала и окончания каждой производственной операции на выбранном типе технологического оборудования.

Целью работы является разработка «направленного» муравьиного алгоритма для оптимизации производственного расписания в ГПС, который легко может быть адаптирован к заданным условиям с учетом дополнительных ограничений задачи.

Разработка «направленного» муравьиного алгоритма. В результате анализа существующих

разработок в области эволюционных методов [3] установлено, что перспективным решением сложных комбинаторных задач оптимизации является использование метода муравьиных колоний. Преимуществом данного алгоритма для поставленной задачи является то, что данный метод не требует построения структурной модели непосредственно самого производственного участка.

Анализ литературы [1,7,8] показал, что муравьиные алгоритмы хорошо показывают себя при решении динамических задач на графах, прежде всего, задач комбинаторной оптимизации, одной из которых является задача синтеза производственного расписания.

При решении задач в динамической среде пространство поиска решений может изменяться. Найденное оптимальное решение через некоторое время, вследствие изменений производственной среды, может стать неоптимальным и даже плохим. При решении таких задач используются специальные приемы [2], которые помогают отслеживать изменяющуюся производственную среду и строить оптимальные решения. Муравьиные алгоритмы допускают простые модификации, которые позволяют достаточно эффективно решать этот класс оптимизационных задач.

Исходя из описанных в п. 3.1. требований к методам муравьиных колоний, была разработана модификация муравьиного алгоритма – «Направленный» муравьиный алгоритм. Эта модификация отличается от уже известных алгоритмов следующими особенностями:

- 1.) метод вычисления вероятности перехода искусственного муравья по вершинам графоаналитической модели, основанный на анализе текущей производственной ситуации;
- 2.) однозначно определённое количество искусственных муравьев в каждой популяции, включая «элитных» особей, зависящее от исправности и готовности к работе технологического оборудования на производственном участке;
- 3.) определение множества доступных для посещения искусственными муравьями вершин, которое содержит в себе списки вершин – кандидатов для их посещения, т.е. составление для всех муравьев, кроме «элитного» списка запрещённых вершин (tabu list);
- 4.) глобальное правило изменения концентрации феромона на дугах графа, учитывающее не «лучшие», как принято считать[7], а «худшие» пути прохода популяции искусственных муравьев с целью их улучшения на следующих итерациях;
- 5.) эвристическая информация основывается на «направленно-пропорциональном» правиле перехода между вершинами.

На рисунке 1 представлена укрупнённая блок-схема «направленного» муравьиного алгоритма для оптимизации производственного расписания в ГПС.

Рассмотрим подробнее особенности предложенного алгоритма.

1. Как уже отмечалось ранее, выбор муравьем очередной вершины не является случайным, а производится с учетом текущей производственной обстановки и учитывает особенности динамически изменяемой среды и эвристическую информацию, накопленную к этому моменту.

Вероятность перехода k-того муравья в вершину O_{ij} определяется соотношением (2).

$$\begin{cases} P_{ij,k}(t) = \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ij}(t)]^\beta}{\sum_{k=1}^l [\tau_{ij}]^\alpha [\eta_{ij}(t)]^\beta}, & O_{ij} \in N_{ij}^k \\ P_{ij,k}(t) = 0, & O_{ij} \notin N_{ij}^k \end{cases} \quad (2)$$

где α – коэффициент значимости концентрации феромона; β – коэффициент значимости эвристической информации; η_{ij} – концентрация феромона на дуге графа; τ_{ij} – эвристическая информация; N_{ij}^k – перечень вершин графа O_{ij} доступных для k-того муравья.

2. Предпочтительность выбора вершины графоаналитической модели основывается на «направленно-пропорциональном» правиле перехода между вершинами, в отличие от некоторых известных модификаций муравьиного алгоритма [...], когда муравей определяет следующую вершину сначала случайным образом, а затем ориентируясь на величину феромона.

«Направленно-пропорциональное» правило перехода основывается на эвристической информации, которая определяется, как отношение времени выполнения технологической операции к запланированному времени изготовления детали $T_{s_{ij}}$ (3), которое в свою очередь корректируется после выполнения каждой технологической операции над партией деталей, согласно формуле (4).

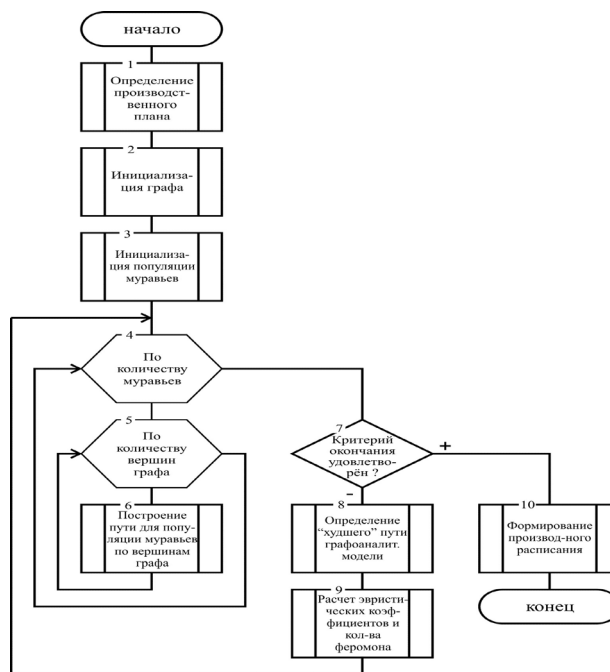


Рисунок 1 – «Направленный» муравьиный алгоритм оптимизации производственного расписания в ГПС

$$\eta_{ij} = \frac{To_{ij}}{Ts_i} \tag{3}$$

где To_{ij} – время выполнения технологической операции O_{ij} над партией деталей i -того типа; Ts_i – срок изготовления партии деталей i -того типа.

$$Ts_i = Ts_i - Tos_{ij} \tag{4}$$

Избранная эвристика, формула расчета которой (3) выбрана очень удачно, так как, даже не используя особенности муравьиного алгоритма, муравей выберет не ту вершину, в которой он раньше освободится после выполнения очередной производственной операции, а тот узел, на котором партия деталей скорее закончит обработку. Это существенно расширяет круг поиска и позволяет найти субоптимальное решение.

3. На каждой итерации «направленного» муравьиного алгоритма все искусственные муравьи пошагово строят путь от начальной до конечной вершины графоаналитической модели. При этом в каждой вершине каждый муравей должен выбрать следующую дугу пути. Если муравей k находится в вершине O_{ij} , он выбирает следующую вершину $\in N_{ij}^k$ на основе вероятностей перехода (2).

Для расчёта концентрации феромона при переходе муравья на следующий узел графа используются «глобальные» правила, способствующие направленному поиску. Данные правила заставляют муравьев двигаться в сторону найденных «худших» решений с целью их «улучшения».

Эта стратегия отдаёт предпочтение эксплуатации пространства поиска и применяется после того, как решение построено, т.е. после прохождения всеми муравьями своего пути. Причём концентрацию феромона разрешается менять только «худшим» (в глобальном смысле) муравьям, которые построили неоптимальный путь $X(t)$. Таким образом, для каждой дуги графа концентрация феромона определяется в соответствии со следующим правилом (5 – 6):

$$\tau_{ij}(t+1) = \tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}(t), \tag{5}$$

где

$$\Delta\tau_{ij}(t) = \sum_{k=1}^{n_k} \Delta\tau_{ij}^k(t), \tag{6}$$

При этом количество феромона, которое откладывает искусственный муравей, вычисляется в зависимости от заданного критерия оптимальности и вычисляется по одному из следующих правил (7 – 9):

– для задачи максимизации среднего коэффициента загрузки оборудования:

$$\Delta\tau_{ij}^k(t) = \frac{1}{\sum_{i,j} T_{п\rho_{ij}^k}}, \quad (7)$$

где $T_{п\rho_{ij}^k}$ – время простоя k-того оборудования перед выполнением технологической операции O_{ij} .
 – для задачи минимизации времени переналадок оборудования:

$$\Delta\tau_{ij}^k(t) = \frac{1}{\sum_{i,j} T_{п_{ij}^k}}, \quad (8)$$

где $T_{п_{ij}^k}$ – время наладки ГПМ для выполнения технологической операции O_{ij}
 – для задачи минимизации длительности цикла изготовления деталей:

$$\Delta\tau_{ij}^k(t) = \frac{1}{\sum_{i,j} T_{п\rho_{ij}^k} + T_{o_{ij}^k}}, \quad (9)$$

В (7 – 9) феромон откладывается обратно пропорционально качеству $f(x^k(t))$ на дугах полного пути, построенного муравьем. При этом для изменения концентрации феромона используется глобальная информация.

Испарения феромона происходит не будет. Это обусловлено тем, что необходимо найти несколько маршрутов, которые вместе давали бы лучший результат работы алгоритма. Исходя из этой особенности, не допустимо, чтобы искусственный муравей проходил весь маршрут с первой по последнюю операцию. Потому что при поиске решений с начала до конца, не учитывая существование других муравьев (технологических машин), в результате получим наложение маршрутов один на другой, что противоречит математической постановке задачи оперативного планирования. Так после выбора следующего узла искусственный муравей с минимальным временем освобождения выберет дугу с максимальной концентрацией феромона. После чего матрица феромонов обновится, и поиск будет начат заново для других муравьев, пока все они не перейдут на новую вершину. Так будет продолжаться, пока все искусственные муравьи (оборудование) не пройдут технологические операции согласно технологической карте производства. Метод вычисления количества феромона, откладываемого каждым муравьем $\Delta\tau_{ij}^k$, позволяет избежать преждевременной стагнации.

4. Популяция искусственных муравьев всегда однозначно определена массивом $K(l)$ (где $l \in [1; n_k]$) и соответствует составу технологического оборудования, задействованного в производстве (ГПМ и транспортные единицы). Таким образом, решается вопрос о числе муравьев n_k в каждой популяции. Причём транспорт рассматривается как «элитный муравей», для которого нет запрещённых вершин (tabu list) и который имеет приоритет перед другими муравьями при переходе от вершины к вершине. Это связано с тем, что на производственном участке обычно именно транспорт является самым загруженным технологическим оборудованием. Таким образом, при малом числе муравьев сходимость алгоритма к кратчайшему пути достаточно хорошая, в то время как большое количество муравьев может привести к тому, что процесс поиска не сходится.

5. Для всех муравьев предопределяется множество доступных для посещения вершин, которое содержит в себе списки вершин – кандидатов для их посещения. Причём для всех муравьев, кроме «элитного» составляется список запрещённых вершин (tabu list). Множество N_{ij}^k определяет множество допустимых вершин для k-го муравья (10). Это множество может включать те вершины O_{ij} , вероятность перехода на которые не равна нулю, вне зависимости от того, посещались ли они k-м муравьем или нет (включая переход по петле). Для этого для каждого муравья создается и отслеживается табу-список. Вершины из этого списка удаляются из N_{ij}^k .

$$N_{ij}^k(t) = V - \gamma_{ij}^k(t), \quad (10)$$

где V – массив всех возможных вершин графа; $\gamma_{ij}^k(t)$ – табу список для k-того муравья

Так для всех искусственных муравьев, кроме «элитных», в список запрещенных вершин всегда однозначно входят вершины графоаналитической модели, обозначающие складские операции по выдаче заготовок, инструмента и приему готовой продукции, т.к. они доступны для посещения только «элитным» муравьям, т.е. транспортному оборудованию.

$$\gamma_{ij}^k(t) = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^n O_{ij} + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n O_{ij}^{P=0} \quad (11)$$

Следует отметить, что список запрещённых вершин (tabu list) для k-го муравья, динамически обновляется после каждого перехода искусственного муравья на новую вершину, неизменным остается только та часть списка, которая соответствует складским операциям.

Эта модификация метода муравьиных колоний включает локальный поиск с использованием tabu-поиска для улучшения решений, полученных на каждой итерации направленного муравьиного алгоритма.

6. В предложенном алгоритме используется один из следующих критериев окончания:

- окончание при превышении заданного пользователем числа итераций;
- окончание по найденному приемлемому решению $f(x^k(t)) \leq \varepsilon$;
- окончание, когда все муравьи следуют одним и тем же путем.

Апробация «направленного» муравьиного алгоритма на контрольном примере. Для исследования параметров алгоритма был проведен эксперимент: на основе графоаналитической и объектных моделей разработан алгоритм и программная реализация синтеза расписания загрузки технологического оборудования некоторого предполагаемого автоматизированного технологического участка.

Исходные данные для исследования алгоритма представлены в таблицах 1-2.

Таблица 1.

Технологическое задание на обработку деталей

№ партии деталей	№ техн. операции	Объём партии, шт.	Время наладки ГПМ, ч.	Время обработки детали, ч.	Запланир. время выпуска партии, ч
1	1	65	0,5	0,0980	200
1	2		0,3	0,0561	
2	1	80	0,4	0,0832	250
2	2		0,5	0,2451	
2	3		0,2	0,0630	
1	1	75	0,4	0,0924	150
2	2		0,3	0,0734	

Таблица 2.

Исходные данные для задачи составления производственного расписания.

№	Параметры	Значение
1.	Количество транспортных единиц	1
2.	Количество ГПМ	2
3.	Количество типов деталей	3
4.	Минимальное количество операций для каждого типа деталей	2
5.	Максимальное количество операций для каждого типа деталей	3
6.	Количество операций для 1 типа деталей	2
7.	Количество операций для 2 типа деталей	3
8.	Количество операций для 3 типа деталей	2

Экспериментально было установлено, что при переходе искусственных муравьев из стартовой вершины, величина начальной концентрации феромона устанавливается в $\tau_0=0,3$ (при переходе «элитных» муравьев в вершины, обозначающие складские операции) и $\tau_0=0,1$ (при переходе всех остальных муравьев в вершины четвертого уровня модифицированной графоаналитической модели).

Путем экспериментальных исследований на контрольном примере было установлено, что для поставленной задачи значение коэффициента $\alpha=0,3 \div 0,5$ дает наилучший результат.

В направленном муравьином алгоритме используется «направленно-пропорциональное» правило перехода между вершинами, поэтому, как было экспериментально установлено на контрольном примере, значение коэффициента β должно варьироваться между значениями 0,5 и 0,8.

В ходе проведенных испытаний направленного муравьиного алгоритма было установлено, что для наилучших результатов его функционирования, коэффициенты алгоритма необходимо экспериментально подбирать для каждой конкретной задачи. Различные производственные участки имеют свои технологические особенности, могут изменяться размеры партий и их количество, состав оборудования и его тип – это все влияет на результат работы алгоритма.

Таким образом, учитывая специфику задачи, можно сделать вывод о том, что однократная настройка параметров алгоритма (α , β и количество итераций n) не является оптимальным вариантом. Также, экспериментально получив несколько комбинаций параметров по окончании работы алгоритма, необходимо выбрать те значения коэффициентов, которые позволят находить «лучшие» решения относительно выбранного критерия оптимизации.

Это означает, что экспериментальный вывод о значении данных параметров на одном производственном участке, может привести к ухудшению результатов, при применении предложенного алгоритма на другом участке. Кроме того, что необходимо экспериментально получить оптимальные значения коэффициентов направленного муравьиного алгоритма, также необходимо иметь возможность автоматически корректировать эти параметры. В связи с этим, принято решение реализовать динамическое изменение основных параметров алгоритма, т.е. после нахождения маршрутов для всех типов технологического оборудования, изменить коэффициенты, с помощью которых возможно повлиять на ход моделирования.

Выводы. В данной статье предложена модификация метода муравьиных колоний для оптимизации производственного расписания в ГПС.

1. Проведены исследования метода и определена предпочтительность выбора вершины графоаналитической модели, основанная на «направленно-пропорциональном» правиле перехода между вершинами.

2. Проведен анализ и выбраны «глобальные правила» для расчёта концентрации феромона при переходе муравья на следующий узел графа, способствующие направленному поиску.

3. Установлен и обоснован размер популяции искусственных муравьёв, соответствующий количеству технологического оборудования, задействованного в производстве (ГПМ и транспорт). Причём транспорт рассматривается как «элитный муравей».

4. Для всех муравьёв предопределяется множество доступных для посещения вершин, которое содержит в себе списки вершин – кандидатов для их посещения. Причём для всех муравьёв, кроме «элитного» определён список запрещённых вершин (tabu list).

5. Проведенные многочисленные компьютерные эксперименты на контрольном примере показали, что эффективность направленного муравьиного алгоритма растёт при увеличении размерности задачи. Также было установлено, что для наилучших результатов его функционирования, коэффициенты алгоритма необходимо экспериментально подбирать для каждой конкретной задачи.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Сачко Н.С. Организация и оперативное управление машиностроительным производством / Н.С. Сачко. – Минск: Новое знание, 2005. – 635 с.
2. Маляренко И. Планирование и оптимизация / И. Маляренко // Корпоративные системы. – 2006. – № 27. – С. 29-32.
3. Ченгар О.В. Аналіз методів, моделей, алгоритмів оперативного планування роботи виробничої ділянки / О.В. Ченгар, Ю.О. Скобцов, О.І. Секірін // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Обчислювальна техніка та автоматизація» – Донецьк, 2010 – Випуск 18 (169) – С. 133-140.
4. Ченгарь О.В. Графоаналитическая модель загрузки гибких производственных модулей автоматизированного технологического участка машиностроительного предприятия / О.В. Ченгарь, Е.О. Савкова // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. Науковий журнал. – Луганськ, 2011 – № 13(167). – С. 239-245.
5. Ченгарь О.В. Объектная модель производственного процесса для составления субоптимального расписания работы автоматизированного технологического участка / О.В. Ченгарь // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Обчислювальна техніка та автоматизація» – Донецьк, 2012 – Випуск 22 (200) – С. 56-62.
6. Ченгарь О.В. Моделирование производственного процесса механообработки в гибкой производственной системе / О.В. Ченгарь // збірник праць Міжнародної наукової конференції «Нейросітьові технології і їх застосування» / під загальною редакцією проф. С. В. Ковалевського. – Краматорськ : ДДМА, 2012 – С. 144-150.
7. Скобцов Ю.А. Основы эволюционных вычислений / Ю.А. Скобцов – Донецк: ДонНТУ, 2008.- 326с.
8. Dorigo M. Swarm Intelligence, Ant Algorithms and Ant Colony Optimization // Reader for CEU Summer University Course «Complex System». – Budapest, Central European University, 2001. – P. 1–38.

ЧЕНГАРЬ Ольга Васильевна – аспирант каф. АСУ ДонНТУ

Научные интересы: прогрессивные информационные технологии.