



## АЛГОРИТМ ОПЕРАТИВНО-КАЛЕНДАРНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ МЕЛКОСЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

А.Н. Коноплев, Ю.А. Кропотов (Владимирский государственный университет)

*Описывается алгоритм построения оперативно-календарного планирования мелкосерийного радиоэлектронного производства. Показано, что в качестве метода минимизации времени технологического цикла оптимально использовать алгоритм муравьиной колонии. Приведены результаты апробации предложенного алгоритма, реализованного в автоматизированной системе разработки календарных планов мелкосерийного радиоэлектронного производства ОАО «Муромский Радиозавод».*

*Ключевые слова:* мелкосерийное производство, оперативно-календарное планирование, алгоритм муравьиной колонии, радиоэлектронное производство.

Качество и эффективность функционирования производственного процесса предприятия во многом определяется эффективностью оперативно-календарного планирования, которое отражает процесс распределения во времени ограниченного числа ресурсов для выполнения проекта, состоящего из заданного множества взаимосвязанных работ. Задача оперативно-календарного планирования традиционно решается в системах класса APS (Advanced Planning & Scheduling) и MES (Manufacturing Execution System).

Существующие на рынке APS и MES решения обеспечивают оперативно-календарное планирование для крупных производств дискретного типа и не всегда в состоянии отслеживать динамику изменения условий организации производства, характерную для предприятий мелкосерийного производства радиоэлектронных изделий. Кроме того, при построении оперативно-календарного плана для указанного вида производств должны учитываться следующие особенности ТП: разделение ТП на технологические операции, наличие ограничений на очередность выполнения технологических операций, реализуемых на специализированных станциях, работа с партиями изделий, необходимость учета времени перепрограммирования станции на выпуск новой партии продукции и т. д.

Таким образом, из всего многообразия систем класса APS и MES, представленных на рынке, ни одна не решает задачи оперативно-календарного планирования для мелкосерийного предприятия по производству радиоэлектронных изделий в полном объеме. Применение известных решений потребует доработки готового ПО под нужды мелкосерийного предприятия.

Поэтому актуальной является разработка автоматизированной системы составления оперативно-календарных планов на примере производства радиоэлектронных изделий, которая адаптивно с высоким быстродействием учитывает динамику изменения условий в организации производств и алгоритма автоматизированного составления оперативно-календарного

плана на основе методов минимизации времени производственных циклов и с учетом всех особенностей ТП.

Для решения поставленной задачи возможно применение следующих методов минимизации времени производственных циклов [1]:

- математического программирования, включая методы и алгоритмы целочисленного линейного программирования и динамического программирования;
- комбинаторные методы, а именно метод ветвей и границ;
- локального поиска, включая методы имитационного моделирования, табуированный поиск;
- эвристические методы, включая генетические алгоритмы, алгоритм муравьиной колонии и метод табуированного поиска.

Анализ данных методов показал, что использование комбинаторного метода и метода динамического программирования не удовлетворяет показателю быстродействия вычисления, так как с ростом размерности задачи экспоненциально возрастает длительность вычислений. Использование имитационного моделирования сталкивается с необходимостью применения большого объема статистических данных для моделирования, а также с недостаточностью точности получения данных.

При решении задач календарного планирования находят применение эвристические методы. Данные методы основаны на алгоритмах построения производственных планов без проведения полного или частичного перебора вариантов, то есть по правилу, которое называется "снижением требований". Оно заключается в отказе от поиска оптимального решения и нахождения вместо этого "хорошего решения" за приемлемое время. Однако методы, применяемые для построения алгоритмов такого типа, значительно зависят от специфики задачи. Таким образом, универсального алгоритма построения производственных планов не существует, и целесообразно предварительно проработать конкретную производственную

задачу с применением разных методов, и выбрать наиболее приемлемое решение согласно экспертным оценкам с учетом критериев оптимальности [2, 3].

Для решения задачи оперативно-календарного планирования ТП разделяется на технологические операции изготовления радиоэлектронных изделий. Предположим, что на производственном участке собирается  $n$  партий изделий радиоэлектронной продукции  $d_i$ , ( $i = 1, 2, 3 \dots n$ ), для этого используется  $m$ , ( $m = 1, 2, 3 \dots l$ ) специализированных станций. Маршрут каждого изделия состоит из  $j$  технологических операций, которые нужно выполнить над изделием  $d_i$ , и обозначается  $O_{ij}$ , ( $j = 1, 2, 3 \dots q_i$ ), где  $q_i$  — общее число операций. Отметим, что две операции из маршрута одного изделия не могут выполняться одновременно. Каждая технологическая операция  $O_{ij}$  характеризуется параметрами  $O_{ij} = (M_{o_{ijm}}, T_{o_{ijm}})$ , где  $M_{o_{ijm}}$  — номер группы специализированной станции по производству радиоэлектронных изделий, на которой будет выполнена технологическая операция  $O_{ij}$ , а  $T_{o_{ijm}}$  — продолжительность выполнения технологической операции на станции  $m$ . При последовательном выполнении операций предусматривается строгая упорядоченность технологического маршрута. Если через  $O_{ijm} t_{нач}$  обозначить время начала технологической операции  $O_{ij}$  на специализированной станции  $m$ , а через  $O_{ijm} t_{кон}$  — окончание технологической операции, тогда  $T_{o_{ijm}} = O_{ijm} t_{кон} - O_{ijm} t_{нач}$ . Очевидно, что в математической модели оперативно-календарного планирования необходимо выполнить условие вида:  $O_{ijm} t_{нач} \geq O_{ijm} t_{кон}$ , которое показывает, что последующая технологическая операция на специализированной станции не начинается до завершения технологической операции на предыдущей станции.

Процесс функционирования системы может быть описан путем задания плана работ, совокупности указаний относительно того, какие именно технологические операции, какими именно группами специализированных станций обслуживаются в каждый момент времени. Построение такого графа эквивалентно определению  $O_{ijm} t_{нач}$  моментов начала технологической операции  $O_{ij}$ . Поэтому план работы можно рассматривать как совокупность моментов начала технологических операций  $\{O_{ijm} t_{нач}\}$ .

Так как возможно получение бесчисленного множества планов (графов), которые удовлетворяют сформулированным условиям, то задача состоит в построении наилучшего плана работ в соответствии с выбранными критериями.

Математическую модель задачи можно представить в следующем виде:

$$F_h \rightarrow \min, \quad h \in \{1, f\},$$

$$\sum_{m=1}^l \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{q_i} O_{ijm} (T_{o_{ijm}} * a_{ij} + t_{o_{ijm}}^{пер.}) \leq \sum_m \phi_m,$$

$$T_{o_{ijm}} = O_{ijm} t_{кон} - O_{ijm} t_{нач}$$

$$O_{ijm} t_{нач} \geq O_{ijm} t_{кон}$$

где  $m$ , ( $m = 1, 2, 3 \dots l$ ) — номер специализированной станции,  $i$ , ( $i = 1, 2, 3 \dots n$ ) — номер обрабатываемого изделия;  $j$ , ( $j = 1, 2, 3 \dots q_i$ ) — порядковый номер технологической операции;  $O_{ijm}$  — булева переменная, принимающая значение «1», если  $j$  — технологическая операция по обработки  $i$ -ого изделия выполняется на станции  $m$ ;  $T_{o_{ijm}}$  — продолжительность выполнения технологической операции на станции  $m$ ;  $a_{ij}$  — размер партии;  $t_{o_{ijm}}^{пер.}$  — время перепрограммирования станции на новую партию;  $\phi_m$  — фонд времени работы  $m$  станции на горизонте планирования. Из данной математической модели можно выделить критерий минимизации длительности производственного цикла, который определяется как:

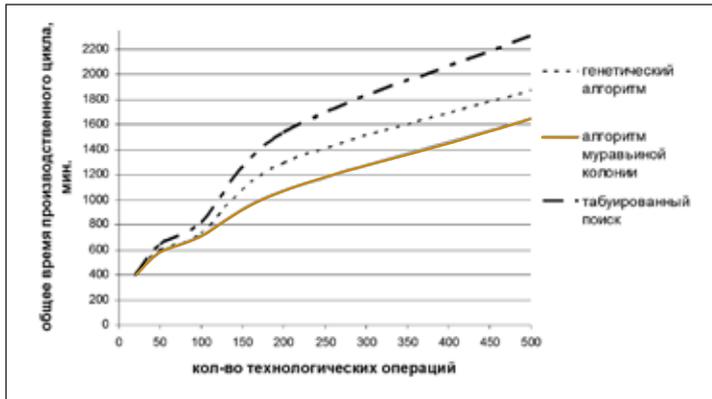
$$F_1 = \sum_{m=1}^l \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{q_i} O_{ijm} (T_{o_{ijm}} * a_{ij} + t_{o_{ijm}}^{пер.}) \rightarrow \min.$$

Таким образом, задача оперативно-календарного планирования сводится к построению графа, который удовлетворяет всем сформулированным в задании условиям. В этом случае критерий минимизации длительности производственного цикла  $F_1$  достигнет своего экстремального значения. Задача составления эффективного оперативно-календарного плана состоит в применении наилучшего метода для нахождения кратчайшего пути в графе, который проходит через все события только один раз и имеет наименьшую продолжительность.

Выше отмечалось, что методы генетического алгоритма, табуированного поиска и алгоритма муравьиной колонии являются основными при решении задач создания эффективного оперативно-календарного планирования. Поэтому исследования оценивания эффективности выполнения задачи оперативно-календарного планирования проведены вышеуказанными методами по критериям: общее время выполнения всех технологических операций, время расчета производственного плана для производственных процессов, включающих различное число технологических операций. Результаты исследования представлены в таблице.

Таблица.

Число технологических операций, ед.	Генетический алгоритм		Алгоритм муравьиной колонии		Табуированный поиск	
	Общее время произв. цикла, мин.	Время расчета плана, с	Общее время произв. цикла, мин.	Время расчета плана, с	Общее время произв. цикла, мин.	Время расчета плана, с
20	385	52	391	74	398	17
50	599	103	584	115	643	41
100	728	365	714	384	819	152
200	1295	748	1072	782	1534	987
500	1872	1553	1645	1580	2305	1170



Длительность производственного цикла в зависимости от числа операций при различных методах организации планирования

Из таблицы видно, что алгоритм муравьиной колонии по сравнению с генетическим алгоритмом имеет преимущество по критерию минимальная длительность производственного цикла. Сравнение алгоритма муравьиной колонии с методом табуированного поиска при применении их в решении задач календарного планирования показывает, что применение метода табуированного поиска дает несколько большее быстродействие, но по критерию минимальная длительность производственного цикла имеет существенно худшие параметры по длительности.

На рисунке приведено сравнение различных методов для задачи оперативно-календарного планирования по критерию минимальное время производственного процесса. Из рисунка видно, что время производственного цикла существенно меньше при использовании алгоритма муравьиной колонии. Поэтому для оптимального нахождения наилучшего пути на графе производственного процесса, для разработки автоматизированной системы составления оперативно-календарного плана с минимизированным временем производственного цикла, предлагается использовать алгоритм муравьиной колонии.

Муравьиные алгоритмы основаны на поведении муравьев, связанном с их способностью быстро находить кратчайший путь от муравейника к цели и быстрая адаптация к изменяющимся условиям для нахождения нового кратчайшего пути [4].

В соответствие с алгоритмом муравьиной колонии, поиск экстремума функции в алгоритме использует параллельное движение нескольких муравьев, которые в ходе движения метят свой путь некотором количеством специального вещества — феромона. Значение феромона задается функцией. Моделирование испарений феромона (с течением времени значение функции уменьшается) в алгоритме необходимо, чтобы найденное локально-оптимальное решение не было единственным, то есть в алгоритме заложено, что муравей будет искать и другие пути. Информация о ходе движения остальных муравьев аккумулируется в общей базе знаний и используется каждым муравьем независимо друг от друга. Каждый муравей при выборе

направления движения ориентируется не только на приращение целевой функции, но и на статистическую информацию о движении остальных муравьев, накопленную в базе знаний.

Для решения задачи с использованием алгоритма муравьиной колонии, необходимо:

- представить задачу в виде ориентированного взвешенного графа;
- задать правило определения и нанесения концентрации феромона;
- разработать эвристику поведения муравья при построении решения;
- определить метод или средство проверки потенциального решения с учетом условий задачи;
- настроить параметры алгоритма, такие как: число муравьев, момент обновления феромона и т. п.

### Алгоритм решения задачи оперативно-календарного планирования

#### 1. Представление задачи в виде ориентированного взвешенного графа.

Для задачи оперативно-календарного планирования составляется граф, в котором вершинами являются единицы автоматизированных станций, выполняющих технологические операции. Ребрами графа является время выполнения технологической операции, которое включает также время ожидания освобождения следующей станции, время перепрограммирования станции и т. д.

#### 2. Создание стартовой точки.

В данном пункте алгоритма задается стартовая точка, куда помещается муравей и начальный уровень феромона. Стартовая точка зависит от условий задачи, так как для каждой задачи способ размещения муравьев является определяющим: либо все они помещаются в одну точку, либо в разные с повторениями, либо без повторений. Начальный уровень феромона инициализируется небольшим положительным числом для того, чтобы на начальном шаге вероятности перехода в следующую вершину не были нулевыми [5].

В задаче оперативно-календарного планирования для определения стартовой точки необходимо запустить обход муравьев графа без нанесения феромона [6, 7]. Данное действие позволит назначить стартовую точку не из произвольного пространства, а из какого-либо локального экстремума.

Для определения времени на данный этап нулевого прохода вычисляется число итераций обхода муравья по формуле [8]:

$$h = \frac{h_0}{e},$$

где  $h_0$  — это начальное число итераций,  $e$  — число Эйлера.

#### 3. Нахождение решения.

На данном этапе алгоритма формируется решение, которое начинается с нулевого частного плана,

и далее к этому плану поступательно добавляются допустимые новые компоненты. Выбор новой компоненты перехода осуществляется определением вероятности перехода муравья  $k$  из вершины  $i$  в вершину  $j$  по следующему выражению:

$$\begin{cases} P_{ij,k}(t) = \frac{\tau_{ij}(t)^\alpha (\eta_{ij})^\beta}{\sum_{j \in J_{i,k}} \tau_{ij}(t)^\alpha (\eta_{ij})^\beta}, \text{ если } j \in J_{i,k} \\ P_{ij,k}(t) = 0, \text{ если } j \notin J_{i,k} \end{cases},$$

где  $\tau_{ij}(t)$  — уровень феромона на дуге графа,  $\eta_{ij}$  — эвристическая информация (где хранится расстояние между вершинами),  $J_{i,k}$  — множество доступных для посещения вершин,  $\alpha$  — коэффициент значимости концентрации феромона,  $\beta$  — коэффициент значимости эмпирической информации.

Следует отметить, что при  $\alpha = 0$  выбирается работа с наибольшей продолжительностью, что соответствует «жадному» алгоритму. При  $\beta = 0$  выбор маршрута основывается только на уровне феромона, что приводит к вырождению маршрутов и соответственно к одному субоптимальному решению.

#### 4. Обновление уровня феромона.

Обновление феромона осуществляется для выбора наилучшего варианта пути движения, так как концентрация феромона увеличивается на коротком (лучшем) пути и уменьшается на других. Данное свойство алгоритма позволяет избежать большой схожести алгоритма.

При переходе на следующий узел муравей откладывает феромон в соответствии с формулой:

$$\tau_{ij}(t+1) = (1 - \rho)\tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}(t),$$

где  $\Delta\tau_{ij}(t) = \frac{1}{L(t)}$ ,  $L(t)$  — длина пути,  $\rho$  — коэффициент интенсивности испарения феромона. Для исключения нулевой вероятности выбора ребра и для выполнения ограничений минимального и максимального значения коэффициента  $\rho$  значение коэффициента должно находиться в пределах  $0 < \rho < 1$ .

5. Выбор критического пути по критерию минимальной длительности производственного цикла, выбранный путь является субоптимальным планом работы.

Представленный алгоритм реализован в автоматизированной системе составления календарных планов организации мелкосерийного производственного процесса по изготовлению радиоэлектронных изделий. В данной системе учитываются особенности и ограничения указанного типа производства; по-

строение субоптимального плана реализуется с использованием различных критериев оптимизации; быстрдействие алгоритма позволяет производить неоднократный перерасчет плана во время рабочей смены; реализуется возможность оперативно реагировать на нештатные производственные ситуации. В случае необходимости при наличии на предприятии бухгалтерской подсистемы, системы складского учета и др. система может быть быстро доработана под индивидуальные требования и интегрирована с имеющимися информационными системами.

Предложенный алгоритм, реализованный в автоматизированной системе разработки календарных планов, прошел апробацию на мелкосерийном предприятии по изготовлению радиоэлектронных изделий ОАО «Муромский Радиозавод». Определен технологический маршрут для каждого изделия, которые обрабатывались на специализированных станциях за конечное число технологических операций, выполняемых с заданной последовательностью, и известно время работы каждой технологической операции. В результате общее время производственного цикла для изготовления изделия П05-01 составило 640,75 ч, а с использованием автоматизированной системы разработки календарных планов на основе алгоритма муравьиной колонии лучший результат составил 618,11 ч.

#### Список литературы

1. Лазарев А.А., Гафаров Е.Р. Теория расписаний. Задачи и алгоритмы. М.: МГУ. 2011.
2. Маляренко И. Планирование и оптимизация // Корпоративные системы. 2006. № 27.
3. Кропотов Ю.А., Быков А.А., Коноплев А.Н. Исследование и расчет статических параметров сигналов при проектировании оперативно-командных телекоммуникационных систем // Методы и устройства передачи и обработки информации: межвуз. сб. научн. тр. Вып. 11. Под ред. В.В. Ромашова, В.В. Булкина. М.: «Радиотехника». 2009.
4. Штовба С.Д. Муравьиные алгоритмы Exponenta Pro // Математика в приложениях. 2003. № 4.
5. Hartmann S.A. Competitive Genetic Algorithm for Resource – Constrained Project Scheduling // Naval Research Logistics. 1998.
6. Dorigo M., Maniezzo V., Colomi A. The Ant System: Optimization by a colony of cooperating agents // IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. Part B. 1996. Vol. 26. No. 1.
7. Dorigo M., Caro G.D., Gambardella L.M. Ant Algorithms for Discrete Optimization // Artificial Life. 1999. Vol. 5. № 2.
8. Гусейн-Заде С.М. Разборчивая невеста. М.: МЦНМО. 2003.

**Коноплев Алексей Николаевич** — старший преподаватель,

**Кропотов Юрий Анатольевич** — канд. техн. наук, проф., заведующий кафедрой «Электроника и вычислительная техника» Муромского института (филиала) ГОУ ВПО «Владимирский государственный университет им. Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

Контактный телефон (49234) 772-72.

E-mail: 23-hero@mail.ru kaf-eivt@yandex.ru