УДК 004.942

Ю.А. СКОБЦОВ, д-р техн. наук, проф., зав. каф. АСУ ДонНТУ (г. Донецк),
О.В. ЧЕНГАРЬ, аспирант, ассистент каф. АСУ ДонНТУ (г. Донецк)

ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО УЧАСТКА МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ НА ОСНОВЕ МЕТОДА МУРАВЬИНЫХ КОЛОНИЙ

Рассматривается задача оптимизации оперативного планирования машиностроительного предприятия на основе муравьиных алгоритмов, выбраны критерии оптимизации. Предложен граф для моделирования работы участка и нахождения оптимальных расписаний работы оборудования. Исследовано влияние основных параметров муравьиных алгоритмов таких, как начальное расположение и мощность популяций муравьиных колоний для партий деталей и т.п. Ил.: 1. Библиогр.: 10 назв.

Ключевые слова: машиностроительное предприятие, оптимальное расписание, граф, муравьиные алгоритмы.

Постановка проблемы и анализ литературы. Автоматизация отделочного и вспомогательного оборудования с использованием современных компьютерных технологий, в условиях бурного развития машиностроения, является одним из основных направлений технического прогресса в машиностроении [1, 2]. Современные тенденции предлагают использовать на производственных участках машиностроительных предприятий автоматизированные системы, способные реализовывать различные технологические операции. Это оборудование должно обеспечивать выполнение заданной номенклатуры технологических операций на участке в установленный срок и иметь способность оперативно реагировать на смену состояния оборудования.

Проблемы оперативного планирования машиностроительных предприятий исследуются достаточно давно [1, 3]. Но до сих пор мало исследовано движение партий деталей непосредственно в производственной среде (на производственном участке) в соответствии с технологическим маршрутом в реальном масштабе времени. С внедрением в производство нового технологического оборудования, актуальным становится использование всех его возможностей [3]. В частности, актуальной задачей является построение оптимальных расписаний работы технологического участка, в соответствии с технологическим маршрутом. Большинство разработанных до настоящего времени методик для оперативно-календарного планирования основано на упрощенных моделях, что снижает их практическую значимость, или эти методики применены лишь для определенных специфических условий [4]. Значительную сложность, кроме того, представляет проблема оценки качества получаемых расписаний. Анализ современных работ по комбинаторной оптимизации на графах (особенно динамических задач) показывает, что одним из самых перспективных подходов является использование муравьиных алгоритмов [5 – 10]. Этот подход позволяет существенно улучшить систему оперативного планирования, тем самым, сократив время получения оптимальных или приемлемых производственных расписаний. Динамические задачи (с изменением данных в процессе решения) позволяют учесть проявление случайных событий, что дает возможность быстро реагировать на смену ситуации и вносить коррективы в исходные данные [6].

Для обеспечения высокой эффективности работы производственных участков и максимального использования возможностей оборудования, необходимо создавать (суб)оптимальное расписание работы оборудования на основе избранных критериев оптимизации [1, 2]. На этой основе можно разработать компьютерную подсистему оперативного планирования работы производственного участка машиностроительного предприятия.

Цель статьи – повышение эффективности работы производственного участка машиностроительного предприятия за счет оптимизации оперативно-календарного планирования на основе метода муравьиных колоний.

Математическая постановка задачи оптимизации оперативно-календарного планирования. Для календарного планирования технологический процесс разделяется на технологические операции [4]. Допустим, что на данном производственном участке обрабатывается n партий деталей d_i (i = 1, 2 …, n). Обозначим некоторую произвольную операцию, которую необходимо выполнить над деталью d_i, через O_{ij} (j =1, 2, …, m_i), где m_i – общее количество операций, которые необходимо выполнить над d_i. Каждая операция O_{ij} однозначно определяется парой $O_{ij} = (l_{ij}\ ,\ T_{ij})$, где l_{ij} – номер группы оборудования, на котором может быть выполнена операция O_{ij}; T_{ij} – продолжительность выполнения операции на некотором эталонном для данной группы оборудования рабочем месте. Под технологическим маршрутом детали обычно понимают порядок прохождения деталью оборудования в процессе обработки или же последовательность выполняемых операций (1)

$$M_i = (\ O_{i1}, O_{i2}, \dots ,\ Q_{im_i}\ ). \qquad (1)$$

При последовательном выполнении операций предусматривается строгая упорядоченность технологического маршрута. Однако можно допустить, и это часто соответствует действительности, что порядок выполнения операций изменяется (не является строгим), то есть упорядоченность выполнения операций частична. Операция O_{ij} должна выполняться без перерыва с самого начала. Если обозначить через t_{ij} – время начала обработки операции O_{ij}, а через $^*t_{ij}$ момент окончания обработки операции, то для эталонного станка всегда должно выполняться условие (2)

$$^*t_{ij} = t_{ij} + T_{tj}. \qquad (2)$$

Очевидно, что время начала обработки операции должно зависеть от времени выполнения предыдущих операций. В частности, для технологического маршрута, заданного в виде уравнения (1), всегда должно выполняться неравенство (3)

$$t_{ij} < t_{ij+1}. \tag{3}$$

Для упрощения решения заданий календарного планирования будем считать, что на каждом рабочем месте не может выполняться более одной операции одновременно. Т.е. ни для каких двух операций O_{i1j1} и O_{i2j2} не может выполняться неравенство (4).

$$t_{i1j1} < t_{i2j2} < {}^{*}t_{i1j1}. \tag{4}$$

Одно из основных заданий оперативного планирования заключается в том, чтобы для производственного участка с заданными технологическими маршрутами обработки деталей составить некоторое расписание, удовлетворяющее сформулированным условиям, которое можно представить в виде графа [4]. Очевидно, построение такого графа эквивалентно определению чисел t_{ij} – моментов начала операции O_{ij}. Таким образом, величины t_{ij} и O_{ij} являются неизвестными в нашем задании и их необходимо найти, исходя из приведенной формулировки задания с учетом ограничений (3) – (4).

Совокупность чисел $\{t_{ij}\}$ ($i = 1, 2, ..., n; j = 1, 2, ..., m_i$), которые удовлетворяют сформулированным условиям и ограничениям, будем называть в дальнейшем расписанием работы производственного участка, или его графом, и помечать символом G. Графом $G(i)$ обработки детали d_i будем называть совокупность чисел $\{t_{ij}\}$ ($j = 1, 2, ..., m_i$).

Очевидно, что существует бесчисленное множество графов, которые удовлетворяют сформулированным условиям и ограничениям. Таким образом, возникает задача построения некоторого наилучшего графа в соответствии с избранным критерием. Для решения задачи составления оптимального расписания необходимо задаться некоторой числовой функцией F (функцией-критерием), определенной на всех графах $G(i)$, что ставит в соответствие каждому графу G определенное число $F(G)$. При этом наилучшему графу должен соответствовать экстремум функции F. Таким образом, задача сводится к тому, чтобы построить граф, который удовлетворяет всем сформулированным в задании условиям и ограничениям, на котором функция $F(G)$ достигнет своего экстремального значения (5)

$$F\,(G) = extr\,F\,(G). \tag{5}$$

Применение муравьиного алгоритма для оптимизации оперативного планирования работы производственного участка. Особенностью поставленной задачи является то, что необходимо найти не один путь (маршрут прохождения деталей по участку), а множество путей с тем, чтобы они давали бы наилучший результат.

Для решения задачи с использованием муравьиного алгоритма, необходимо:

1) Соответствующее представление в виде графа для описания дискретного пространства поиска. Граф должен представлять все состояния и переходы между ними.

2) Определить правила коррекции концентрации феромона, которые определяют положительную обратную связь в процессе.

3) При необходимости разработать эвристику для определения преимущества дуги в графе.

4) Определить эвристику поведения муравья при построении решения в виде вероятности перехода.

5) Определить средство проверки потенциального решения с учетом ограничений задачи.

6) Определить основные параметры муравьиного алгоритма (число искусственных муравьев и т. п.).

Для задачи календарного планирования можно составить следующий граф. Вершины – единицы оборудования, на которых выполняются операции над деталью. Ребра – суммарное время, которое ожидает деталь до перехода к следующей вершине. Это время обработки на текущем оборудовании плюс время ожидания освобождения следующего оборудования (время переналадки оборудования, время перехода, ...). Таким образом, был получен граф, представленный на рисунке.

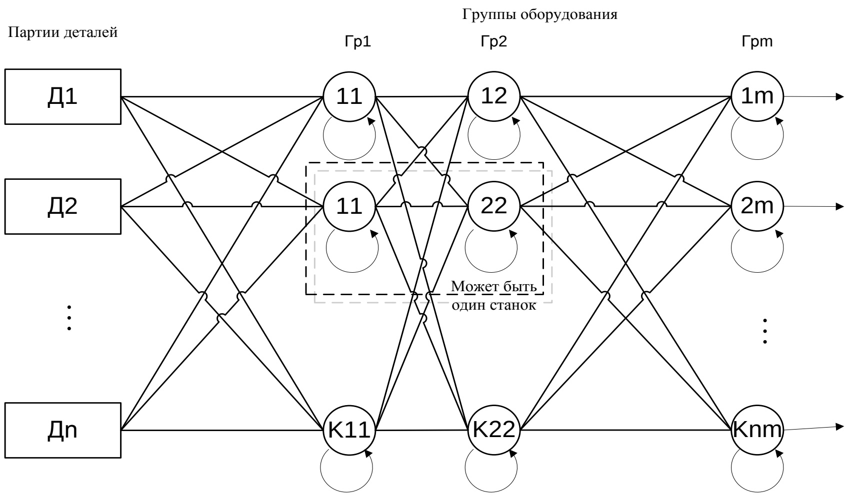

Рис. Граф для задания оперативного планирования производственного участка

Таким образом, для каждой партии деталей, необходимо провести цикл поиска оптимального плана, с учетом найденных ранее соотношений.

Эвристическая информация для определения преимущества дуги в графе может быть представлена в различной форме и зависит от задания [6]. Например, для выбора кратчайшего пути можно использовать формулу (6)

$$\eta_{ij} = \frac{1}{d_{ij}}, \tag{6}$$

где d_{ij} – расстояние между вершинами i и j.

Очевидно, что в этом случае преимущество предоставляется короткой дуге, которая выходит из вершины i. В нашей задаче расстояние между вершинами i и j определяется выражением (7)

$$d_{ij} = T_{\text{осв}} + T_{\text{нал}} + kT_{\text{обр}} + T_{\text{тр}}, \tag{7}$$

где $T_{\text{осв}}$ – время, освобождение группы оборудования для избранных деталей; $T_{\text{нал}}$ – время, необходимое для переналадки оборудования; k – количество деталей в партии; $T_{\text{обр}}$ – время, необходимое для обработки одной детали на оборудовании; $T_{\text{тр}}$ – время транспортировки партии деталей до избранного станка.

В зависимости от выбора критериев оптимизации эвристическая информация может быть различной, поэтому расчет расстояния между вершинами графа может отличаться. Если необходимо минимизировать пребывание деталей на складе, то необходимо учитывать только время перехода на другую единицу оборудования, без учета возможности обработки.

Учет концентрации феромона на дугах графа определяется соответственно избранной эвристики (7). При этом муравей избирает не тот узел (оборудование), который раньше освободится, чтобы иметь возможность принять на обработку партию деталей, а тот, на котором его партия скорее закончит обработку [10]. Это расширяет круг поиска и позволяет найти оптимальное решение. В процессе решения концентрация феромона на дугах графа изменяется каждым муравьем. При переходе на следующий узел, муравей откладывает феромон в соответствии со следующим правилом

$$\tau_{ij}(t+1) = \tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij,k}(t), \tag{8}$$

где $\Delta\tau_{ij,k}(t) = \dfrac{1}{L_k(t)}$, $L_k(t)$ – длина дуги графа.

Испарение феромона в этом случае не учитывается. Это обусловлено тем, что необходимо найти несколько маршрутов, которые вместе давали бы лучший результат работы. Исходя из этой особенности, нежелательно, чтобы один муравей проходил весь маршрут с первой по последнюю операцию. Потому что при поиске маршрутов с начала до конца, не учитывая существования других партий деталей, в результате получим наложение маршрутов одного на другой, что противоречит математической постановке задачи составления оптимального расписания [7, 8, 10]. Так как после выбора следующего узла всеми муравьями системы, будет избранна дуга с максимальной концентрацией феромона, все муравьи партии с минимальным временем освобождения для данной дуги перейдут на следующий узел. После чего матрица феромона обновляется и поиск начинается заново для других партий деталей, пока все партии не перейдут на следующий узел. Этот процесс продолжается, пока все партии деталей не пройдут обработку на данном технологическом участке, в соответствии с технологическим маршрутом.

Вероятность перехода муравья из вершины i в вершину j определяется следующим соотношением:

$$P_{ij,k}(t) = \begin{cases} \dfrac{[\tau_{ij}(t)]^{\alpha} \cdot [\eta_{ij}(t)]^{\beta}}{\sum\limits_{l \in J_{i,k}} [\tau_{il}(t)]^{\alpha} \cdot [\eta_{il}(t)]^{\beta}}, & \text{если} \quad j \in J_{i,k}, \\ 0, \quad \text{если} \quad j \notin J_{i,k}, \end{cases} \tag{9}$$

где α – коэффициент значимости концентрации феромона; β – коэффициент значимости эмпирической информации; $\tau_{ij}(t)$ – концентрация феромона на дуге графа; $\eta_{ij}(t)$ – эвристическая информация; $J_{i,k}$ – множество доступных для посещения вершин (оборудование, на котором может быть выполнена следующая технологическая операция, в соответствии с технологическим маршрутом). В ходе работы разработана функциональная структура подсистемы и создано информационное и программное обеспечение. Для разработки специального программного обеспечения избрана распространенная объектно-ориентированная среда программирования Builder 6. Проведено исследование построенной модели. Экспериментально доказана результативность разработанного алгоритма.

Выводы. Календарное планирование, которое составляет основу оперативного управления предприятием, является очень трудоемкой задачей. В традиционном подходе решения этой задачи есть существенные недостатки, потому предложено применение новых методов, которые основываются на системах искусственного интеллекта, позволяющих создавать более гибкие модели, чем методы статистической обработки информации. На основе анализа существующих разработок в области эволюционных методов перспективным является решение сложных комбинаторных задач оптимизации (особенно динамических задач) с использованием муравьиного алгоритма. Это позволяет существенно улучшить систему оперативного планирования, тем самым, сократив время получения оптимальных или приемлемых производственных расписаний. Кроме этого, учет появления случайных событий, которые влияют на процесс производства, позволяет быстро реагировать на смену и внесение корректив в выходные данные.

Рассмотрено применение муравьиного алгоритма для решения задачи оптимизации работы производственного участка машиностроительного

предприятия. Описана математическая постановка задачи, избранны критерии оптимизации. Предложен граф для моделирования работы участка с целью поиска оптимальных расписаний работы оборудования. Проанализированы и учтены особенности поставленной задачи, предложен способ объединения строгой последовательности операций с возможностями автоматизированных систем. Определены эвристические знания для выбора следующего узла графа, определены правила перехода. Компьютерный эксперимент подтвердил эффективность предложенных решений.

Список литературы: 1. *Сачко Н.С.* Организация и оперативное управление машиностроительным производством / *Н.С. Сачко*. – Минск: Новое знание, 2005. – 635 с. **2.** *Тюленев Л.В.* Организация и планирование машиностроительного производства: Учебное пособие / *Л.В. Тюленев*. – СПб: Бизнес-пресса, 2001. – 304 с. **3.** *Михайлова Л.В.* Формирование и оперативное управление производственными системами на базе поточно-группового производства в автоматизированном режиме / *Л.В. Михайлова, Ф.И. Парамонов, А.В. Чудин.* – М.: ИТЦ МАТИ, 2002. – 60 с. **4.** *Маляренко И.* Планирование и оптимизация / *И. Маляренко* // Корпоративные системы. – 2006. – № 27. – С. 29-32. **5.** *Люггер Дж.Ф.* Искусственный интеллект. Стратегии и методы решения сложных проблем / *Дж.Ф. Люгер*. – М.: Вильямс, 2005. – 864 с. **6.** *Скобцов Ю.А.* Основы эволюционных вычислений: учебное пособие / *Ю.А. Скобцов*. – Донецк: ДонНТУ, 2008. – 326 с. **7.** *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. **8.** *МакКоннелл Дж.* Основы современных алгоритмов / *Дж. МакКоннелл*. – М.: Техносфера, 2004. – 368 с. **9.** *Bryant K.* Genetic Algorithms and the Traveling Salesman Problem / *K. Bryant, A. Benjamin*. – Department of Mathematics, HarveyMudd College, 2000. **10.** Ant Colony Optimisation [Электронный ресурс]: *Dr Jonathan Thompson*, School of Mathematics, Cardiff University. – Электронные данные. – Режим доступа: www.orsoc.org.uk/region/regional/swords/swords.ppt – Дата доступа: февраль 2010. – Загл. с экрана.

УДК 004.942

Оптимізація роботи виробничої ділянки машинобудівного підприємства на основі методу мурашиних колоній / Скобцов Ю.О., Ченгар О.В. // Вісник НТУ "ХПІ". Тематичний випуск: Інформатика і моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2010. – № 31. – С. 177 – 183.

Розглядається задача оптимізації оперативного планування машинобудівного підприємства на основі мурашиних алгоритмів, обрані критерії оптимізації. Запропонований граф для моделювання роботи ділянки і знаходження оптимальних розкладів роботи обладнання. Досліджений вплив основних параметрів мурашиних алгоритмів таких, як початкове розташування і потужність популяцій мурашиних колоній для партій деталей тощо. Іл.: 1. Бібліогр.: 10 назв.

Ключові слова: машинобудівне підприємство, оптимальний розклад, граф, мурашині алгоритми.

UDC 004.942

Machine-building enterprise production work area optimization on the basis of ant colony method / Skobtsov J.A., Chengar O.V. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2010. – №. 31. – P. 177 – 183.

The problem of the machine-building enterprise operative planning optimization is defined with the use of ant algorithms. The criteria of optimization are chosen. A graph for modeling of area work and finding of optimum timetable of equipment work is offered. Basic parameters of ant algorithms such, as an initial location and power population of ant colonies for parties of details, is researched. Figs: 1. Refs: 10 titles.

Key words: machine-building enterprise, optimum timetables, graph, ant algorithms.

Поступила в редакцию 29.052010