

УДК 658.513

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ПЛАНИРОВАНИЯ И ПОСТРОЕНИЯ РАСПИСАНИЙ РАБОТ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ

Е.Н. Хоботов

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
Россия, 107005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5

Учреждение российской академии наук Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН

Россия, 117997, ГСП-7, В-342, Москва, Профсоюзная, 65

E-mail: e_khobotov@mail.ru

А.М. Сидоренко

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
Россия, 107005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5

E-mail: sidorluty@gmail.com

Рассматриваются алгоритмы построения планов и расписания обработки комплектующих деталей, а также сборки из них сложных изделий. Сформированные по таким принципам планы при необходимости могут быть детализированы до расписания обработки отдельных деталей. В основу предлагаемых алгоритмов для сокращения времени построения планов и расписаний обработки положена идея распараллеливания вычислений.

Ключевые слова: задачи планирования, построение расписаний работ, параллельные вычисления в задачах моделирования, анализа, идентификации, управления и оптимизации.

USE OF PARALLEL COMPUTING IN SOLVING PROBLEMS OF PLANNING AND SCHEDULING FOR ENTERPRISES / A.M.

Sidorenko (Moscow State Technical University named after Bauman, 5, 2-nd Bauman st., Moscow 107005, Russia), E.N. Khobotov (Moscow State Technical University named after Bauman, 5, 2-nd Bauman st., Moscow 107005, Russia). The algorithms of planning and scheduling of component parts and products assembling out of these parts are considered. Such plans may be detailed to processing schedules of separate parts. Proposed algorithms are based on the idea of parallel calculations for reducing time of plan's building.

Keywords: process planning, scheduling, parallel computing for modeling, analysis, identification, control and optimization.

Введение

Созданию моделей и методов планирования работ и построения расписаний обработки деталей на машиностроительных производствах в последние годы уделяется повышенное внимание. Такое внимание вызвано тем, что удачно построенные планы работ позволяют эффективнее загружать оборудование предприятия, сокращать время выполнения заказов и благодаря этому существенно повышать рентабельность производства.

Для планирования работ и построения расписаний обработки деталей на уровне отдельных производственных систем (ПС) и участков уже разработано большое количество эффективно работающих методов, которые позволяют достаточно быстро получать их решение.

В тех же случаях, когда в состав предприятия входит несколько ПС и производственных участков, построение планов и расписания обработки с использованием традиционных методов решения этих задач вызывает уже весьма значительные затруднения из-за большой размерности и сложности возникающих задач. Попытки получения решений таких задач на основе даже оптимальных планов работы для отдельных ПС и участков, как правило, не приводят к удовлетворительным результатам. Кроме того, удалось построить примеры [1], показывающие, что общее время изготовления изделий при произвольном порядке обработки комплектующих деталей, но при правильном выборе последовательности сборки из них готовых изделий занимает меньше времени, чем при оптимальном порядке обработки комплектующих деталей, но при неудачном выборе последовательности сборки из них готовых изделий.

В работе [2] для построения планов работы на уровне предприятий предлагалось формировать «укрупненное» или «каркасное» расписание обработки групп деталей каждого изделия и использовать специальные алгоритмы для определения последовательности сборки изделий.

Однако при большом количестве комплектующих деталей и собираемых изделий построение планов и расписаний обработки требует весьма значительного времени, что может снизить эффективность управления на уровне предприятия и не позволит повысить рентабельность производства.

В связи с этим возникает весьма важная и актуальная проблема, связанная с разработкой таких алгоритмов построения «каркасных» расписаний обработки комплектующих деталей каждого изделия и определения последовательности сборки изделий, которые позволят строить подобные планы и расписания работ за приемлемое время.

В данной работе рассматриваются алгоритмы построения планов и расписания обработки комплектующих деталей, а также сборки из них сложных изделий. В основу предлагаемых алгоритмов для сокращения времени построения планов и расписаний обработки положена идея распараллеливания вычислений, которая позволяет значительно сократить время расчетов планов и расписаний работ. Сформированные по таким принципам планы при необходимости могут быть детализированы до расписания обработки отдельных деталей.

1. Задача планирования и построения расписаний работ

Рассмотрим более подробно постановку задачи, в которой требуется построить расписание сборки сложных изделий.

Пусть имеется «портфель заказов», содержащий известное количество изделий различных типов, которые должны быть последовательно изготовлены на предприятии.

Для каждого изделия, входящего в этот «портфель заказов», известен состав комплектующих его деталей и узлов, последовательность и время установки всех деталей и узлов в собираемое изделие. Для всех комплектующих деталей производимых изделий известно оборудование предприятия, используемое для обработки каждой из деталей, а также время и последовательность обработки детали на всем используемом оборудовании предприятия.

Требуется определить последовательность сборки изделий, входящих в «портфель заказов», а также построить расписание обработки всех комплектующих деталей каждого изделия на обрабатывающем оборудовании предприятия. Последовательность обработки комплектующих деталей и сборки из них изделий требуется выбрать таким образом, чтобы по возможности сократить общее время выполнения «портфеля заказов».

2. Принципы построения алгоритмов решения

Как уже отмечалось выше, для построения планов работы на уровне предприятий в [2] предлагалось формировать «укрупненное» или «каркасное» расписание обработки групп деталей каждого изделия и использовать специальные алгоритмы для определения последовательности сборки изделий.

Для сокращения сроков и затрат на выполнение заказов комплектующие детали для собираемых изделий обычно обрабатываются в процессе сборки самих изделий, но их обработка должна быть закончена раньше, чем они понадобятся при сборке.

Поэтому процесс сборки изделий разделяют на этапы. Пока производится установка деталей и узлов в изделие на некотором этапе сборки изделия на обрабатывающих системах и участках предприятия в течение этого этапа производится изготовление комплектующих деталей, которые будут устанавливаться в изделие уже на следующем этапе сборки и т. д.

При построении «каркасных» расписаний все партии комплектующих деталей каждого этапа сборки разделяются на группы. Разделение осуществляется таким образом, чтобы все детали одной группы при своей обработке в одной последовательности проходили бы одни и те же производственные системы и участки предприятия. После формирования таких групп определяются времена обработки деталей каждой группы на тех производственных участках предприятия, где соответствующая группа деталей обрабатывается. Каждая из сформированных групп деталей рассматривается, как обобщенная деталь, а производственный участок, на котором обрабатывается эта группа деталей, рассматривается, как обобщенный станок. Это позволяет использовать для построения «каркасных» расписаний обработки таких групп деталей на уровне предприятия традиционные методы построения расписаний обработки деталей [3].

Весьма важными операциями при построении «каркасных» расписаний являются операции, связанные с построением расписаний обработки каждой группы деталей на оборудовании участков предприятия, где эта группа обрабатывается, а также с определением времени их обработки на этих участках.

Каждая деталь любого изделия может входить только в одну группу и построение расписания обработки деталей каждой группы на оборудовании участка предприятия, и определение этого времени является операцией, которая не зависит от последовательности и построения расписаний обработки деталей в других группах и на других участках предприятия. Поэтому возникает возможность создания параллельных алгоритмов построения «каркасных» расписаний.

Для пояснения и идей и принципов построения таких алгоритмов рассмотрим более подробно методы построения расписаний обработки деталей и сборки изделий, когда имеется один сборочный цех, а количество производственных систем и участков механообработки $\tilde{M} > 1$.

В этом случае задача определения последовательности сборки изделий напоминает задачу Джонсона [2-3], если производственные системы и участки, на которых производится обработка комплектующих деталей, рассматривать как первый станок, а сборочный участок как второй станок. Тогда время обработки всех комплектующих деталей некоторого изделия можно рассматривать как аналог времени обработки детали на первом станке в задаче Джонсона, а время сборки этого изделия – как аналог времени обработки этой детали на втором станке в задаче Джонсона.

Для решения данной задачи могут быть построены различные алгоритмы, также использующие идею алгоритма решения задачи Джонсона [2-3]. Однако для их

использования необходимо определить или оценить время обработки комплектующих каждого изделия на участках и производственных системах предприятия.

Рассмотрим один из таких алгоритмов решения, который основан на использовании оценок времени обработки комплектующих деталей \tilde{T}_i для изделия i -го типа и времени сборки \hat{T}_i из них изделия. Такой алгоритм позволяет достаточно быстро получать приближенное решение задачи.

Для определения величин \tilde{T}_i ($i=1, \dots, L$) разобьем на группы детали, комплектующие каждое изделие, как уже отмечалось выше, таким образом, чтобы все детали одной группы при своей обработке в одной последовательности проходили бы одни и те же производственные системы или участки предприятия. Пусть для изделий i -го типа таких групп будет P_i ($i=1, \dots, L$).

Обозначим через G_{ip} множество деталей i -го изделия, которые обрабатываются в составе p -й группы ($p=1, \dots, P_i$).

Предположим для простоты, что каждая деталь любого изделия может обрабатываться только по одному технологическому маршруту, а партии изделий небольшие и к началу сборки партии какого-либо изделия все комплектующие для этой партии должны быть готовы. Эти предположения не являются принципиальными, но позволяют избежать весьма громоздких записей формул и упростить изложение методов планирования.

Для каждого изделия оценивается время обработки всех групп комплектующих деталей на тех производственных участках, на которых соответствующая группа деталей обрабатывается.

Для оценки времени обработки деталей p -й группы i -го изделия на v -м производственном участке ($p=1, \dots, P_i$, $v=1, \dots, \tilde{M}$) решается задача минимизации функционала следующего вида:

$$J_{ivp} = \alpha_1 \sum_{j \in G_{ip}} \sum_{r \in I_{iv}} \sum_{l=1}^{m_{vr}} \tilde{\theta}_{ijr}^{lv} c_{ijr}^v + \alpha_2 T_{ivp}, \quad (1)$$

при наличии ограничений:

$$\sum_{j \in H_{ipvr}} \{ \theta_{ijr}^{lv} n_i \tilde{N}_{ij}^v t_{ijr}^v + \tilde{\theta}_{ijr}^{lv} \tau_{ijr}^v \} \leq \mu_v T_{ivp}, \quad r=1, \dots, R_v, \dots, l=1, \dots, m_{vr}, \quad (2)$$

$$\sum_{l=1}^{m_{vr}} \theta_{ijr}^{lv} = 1, \quad j \in G_{ip}, \quad r=1, \dots, R_v, \quad (3)$$

$$\tilde{\theta}_{ijr}^{lv} - \theta_{ijr}^{lv} \geq 0, \quad j \in G_{ip}, \quad r=1, \dots, R_v, \quad l=1, \dots, m_{vr}, \quad (4)$$

где α_1 и α_2 – весовые коэффициенты, I_{iv} – множество типов оборудования, которое используется на v -м производственном участке для обработки детали j -го типа, входящей в состав i -го изделия; T_{ivp} – время обработки деталей i -го изделия, которые обрабатываются в составе p -й группы на v -м производственном участке; H_{ipvr} – множество деталей из p -й группы, входящей в состав i -го изделия, которые обрабатываются на оборудовании r -го типа на v -м производственном участке, n_i – размер i -й партии изделий, т. е. количество изделий в i -й партии; \tilde{N}_{ij}^v – количество деталей j -го типа, которое входит в одно изделие i -го типа; t_{ijr}^v – время обработки детали j -го типа, которая входит в состав изделия i -го типа, на оборудовании r -го типа, которое входит в состав v -го производственного участка; τ_{ijr}^v – время переналадки оборудования r -го типа, которое входит в состав v -го производственного участка, для обработки деталей j -го типа, входящих в изделия i -го типа;

μ_v – коэффициент загрузки оборудования на v -м производственном участке; θ_{ijr}^{lv} – переменная ($0 \leq \theta_{ijr}^{lv} \leq 1$); $\tilde{\theta}_{ijr}^{lv}$ – переменная типа $\{0,1\}$.

Величина θ_{ijr}^{lv} показывает какая часть партии $n_i \tilde{N}_{ij}$ деталей j -го типа, которые входят в состав изделия i -го типа, будет обрабатываться на l -м оборудовании r -го типа v -го производственного участка.

Величина $\tilde{\theta}_{ijr}^{lv}$ равна единице, если, хотя бы одна деталь j -го типа, входящая в состав изделия i -го типа, будет обрабатываться на l -м оборудовании r -го типа v -го производственного участка.

Если в цехе или производственном участке имеются станки только различных типов, т. е. все m_{vr} равны 1, то все переменные θ_{ijr}^{lv} и $\tilde{\theta}_{ijr}^{lv}$ будут равны 1 и решение этой задачи так же, как и в ранее рассмотренной модели, сводится к вычислению сумм

$$\sum_{j \in G_p} \{n_i \tilde{N}_{ij} t_{ijr}^v + \tau_{ijr}^v\} = \mu_v \tilde{T}_{ivpr}$$

и выбору из \tilde{T}_{ivpr} максимальной величины, т. е. $T_{ivp} = \max_r \{\tilde{T}_{ivpr}\}$. Это существенно упрощает производимые расчеты.

В результате решения задачи (1)-(4) получается достаточно неплохая оценка времени обработки деталей p -й группы i -го изделия на v -м производственном участке T_{ivp} .

Во многих случаях, однако, возникают ситуации, когда размерности задач вида (1)-(4) оказываются весьма значительными. Такие ситуации возникают при большом количестве типов изделий, выпускаемых на предприятии, при большом количестве типов деталей, которые входят в состав каждого изделия, а также при большом количестве станков и особенно станков одного типа на производственных участках предприятия.

В этих случаях могут оказаться полезными более грубые модели для оценки времени обработки деталей p -й группы i -го изделия на v -м производственном участке.

Рассмотрим одну из самых простейших моделей такого типа. В этой модели требуется минимизировать функционала следующего вида:

$$\tilde{J}_{ivp} = T_{ivp}, \quad (5)$$

при наличии ограничений

$$\sum_{j \in G_p} \{n_i \tilde{N}_{ij} t_{ijr}^v + m_{rv} \tau_{ijr}^v\} \leq \mu_v m_{rv} T_{ivp}, \quad r = 1, \dots, R_v, \quad (6)$$

где m_{rv} – количество станков r -го типа входящих в состав v -го производственного участка. Величина m_{rv} не является переменной.

В такой модели не производится распределения деталей одной партии по станкам одного типа, т. е. не производится «распараллеливания» обработки каждой партии деталей по станкам одного типа, что весьма затрудняет построение расписания обработки деталей на производственном участке. Решение задачи (5)-(6) также сводится к вычислению сумм

$$\sum_{j \in J_p} \{n_i \tilde{N}_{ij} t_{ijr}^v + m_{rv} \tau_{ijr}^v\} = \mu_v m_{rv} \tilde{T}_{ivpr}, \quad r = 1, \dots, R_v,$$

и выбору из \tilde{T}_{ivpr} максимальной величины, т. е. $T_{ivp} = \max_r \{\tilde{T}_{ivpr}\}$.

После получения оценок времени обработки T_{ivp} для всех групп деталей ($i = 1, \dots, L$; ; $p_i = 1, \dots, P_i$) на всех производственных участках предприятия ($v = 1, \dots, \tilde{M}$) оценивается время \tilde{T}_i , необходимое для обработки всех деталей, которые используются для сборки i -х изделий.

Для получения более грубых оценок может быть решена задача, в которой требуется минимизировать функционала следующего вида:

$$J_i = \tilde{T}_i, \quad (7)$$

при наличии ограничений

$$\sum_{p \in V_{iv}} \{T_{ivp}\} \leq \tilde{\mu}_{iv} \tilde{T}_i, \quad v = 1, \dots, \tilde{M}, \quad (8)$$

где V_{iv} – множество групп i -го изделия, которые обрабатываются на v -м производственном участке или системе, $\tilde{\mu}_{iv}$ – средний коэффициент загрузки оборудования на v -м производственном участке или системе при обработке деталей i -го изделия ($0 \leq \tilde{\mu}_{iv} \leq 1$).

Решение задачи (7)-(8) также сводится к вычислению сумм

$$\sum_{p \in V_{iv}} \{T_{ivp}\} = \tilde{\mu}_{iv} \tilde{T}_i, \quad v = 1, \dots, \tilde{M},$$

и выбору из \tilde{T}_i максимальной величины, т. е. $\tilde{T}_i = \max_v \{\tilde{T}_i\}$.

Более точная оценка времени обработки комплектующих деталей для i -го изделия на производственных участках предприятия может быть получена, если каждую группу p деталей i -го изделия считать за некоторую обобщенную деталь, а участки и производственные системы предприятия – за обобщенные станки. Время обработки p -й обобщенной детали i -го изделия на v -м обобщенном станке будет равно T_{ivp} . Последовательность обработки каждой группы деталей любого изделия на участках и системах предприятия известна.

Тогда, используя традиционные методы построения расписания обработки деталей, можно построить расписание обработки групп деталей, комплектующих i -е изделие, на участках и системах предприятия, то есть «каркасное» расписание обработки групп деталей i -го изделия. Построение такого расписания не вызывает никаких проблем, поскольку методы построения расписания обработки деталей, когда их количество и количество станков не является значительным, хорошо развиты и позволяют достаточно быстро строить весьма хорошие расписания обработки деталей. В результате построения расписания время окончания обработки последней группы деталей и даст оценку времени обработки комплектующих деталей изделия. В результате этого будет получена более точная оценка времени обработки комплектующих деталей каждого изделия.

В этом случае, как уже упоминалось выше, задача определения последовательности сборки изделий может рассматриваться как задача Джонсона [2-3], если производственные системы и участки, на которых производится обработка комплектующих деталей, рассматривать как первый станок, а сборочный участок – как второй станок. Тогда время обработки всех комплектующих деталей i -го изделия \tilde{T}_i можно рассматривать как аналог времени обработки i -й детали на первом станке в задаче Джонсона, а время сборки этого изделия \hat{T}_i – как аналог времени обработки этой детали на втором станке в задаче Джонсона.

Для получения более точных расписаний могут быть построены алгоритмы, в которых величины T_{ivp} и \tilde{T}_i определяются не по оценкам, а в результате построения расписаний обработки для всех групп деталей каждого изделия. При этом расписания последовательно обрабатываемых групп должны быть согласованы, т. е. по мере освобождения оборудования от обработки деталей предыдущей группы или незанятое оборудование должно сразу заниматься обработкой деталей следующей группы.

3. Принципы распараллеливания алгоритмов построения расписаний

Рассмотрим теперь принципы создания параллельных алгоритмов, которые позволят строить расписания обработки комплектующих деталей и сборки готовых изделий для предприятий с дискретным характером производства.

Как уже отмечалось выше, для построения расписаний работ на уровне предприятий в [2] предлагалось строить «каркасные» расписания работ. При построении «каркасных» расписаний все партии комплектующих деталей каждого этапа сборки разделяются на группы. После формирования таких групп определяются времена обработки деталей каждой группы на тех производственных участках предприятия, где соответствующая группа деталей обрабатывается. Каждая из сформированных групп деталей рассматривается, как обобщенная деталь, а производственный участок, на котором обрабатывается эта группа деталей, рассматривается, как обобщенный станок. Это позволяет использовать для построения «каркасных» расписаний обработки таких групп деталей на уровне предприятия традиционные методы построения расписаний обработки деталей [3]. Разделение комплектующих деталей на группы осуществляется таким образом, чтобы все детали одной группы при своей обработке в одной последовательности проходили бы одни и те же производственные системы и участки предприятия.

Если же количество производственных систем и участков на предприятии оказывается значительным, то построение планов и расписаний работ может занимать весьма большое время, что в свою очередь может существенно снизить эффективность управления предприятием.

Однако особенности описанных в предыдущем пункте методов построения расписаний позволяют распараллелить вычисления и за счет этого существенно сократить время построения планов и расписаний работ.

Дело в том, что для построения «каркасного» расписания работ на предприятии требуется определить времена обработки каждой группы на тех производственных участках предприятия, где соответствующая группа деталей обрабатывается. Для определения времени обработки деталей каждой группы на производственных участках предприятия могут использоваться оценочные модели вида (1)-(4) или эти времена могут быть определены путем построения расписания обработки соответствующей группы. Причем эти времена могут вычисляться независимо друг от друга в любой последовательности.

Поэтому на многопроцессорных вычислительных средствах можно организовать параллельные вычисления времени обработки групп деталей на соответствующих производственных системах и участках.

В связи с этим, для построения «каркасного» расписания работ может быть предложен алгоритм, состоящий из следующих шагов.

Шаг 1. Произвести разделение комплектующих деталей каждого изделия на группы в соответствии с приведенным выше правилом. Такое разделение на группы для каждого изделия осуществляется только раз и может использоваться до тех пор, пока не производится модернизация изделия, технологии обработки деталей или производства. Перейти к Шагу 2.

Шаг 2. Положить i равным 1 и перейти к Шагу 3.

Шаг 3. Сформировать матрицу времени обработки групп деталей i -го изделия на производственных системах предприятия A_i , размерность которой равна $P_i \times \tilde{M}$. Каждый элемент такой матрицы a_{ij} определяет время обработки l -й группы деталей i -го изделия на j -м производственном участке.

Для этого вычисляются времена обработки групп деталей i -го изделия на всех используемых производственных системах предприятия. Вычисление времени обработки группы деталей на производственном участке производится на одном процессоре многопроцессорной системы и может производиться одновременно с вычислением времени обработки других группы деталей на других процессорах системы.

Шаг 4. Построить «каркасное» расписание обработки групп деталей i -го изделия на производственных системах предприятия и определить время обработки комплектующих деталей i -го изделия. Перейти к Шагу 5.

Шаг 5. Проверить все ли времена обработки комплектующих деталей изготавливаемых изделий определены. Если определены все времена, то следует переход к Шагу 6. В противном случае i полагается равным $i + 1$ и следует переход к Шагу 3.

Шаг 6. Определить порядок сборки изделий с использованием алгоритмов, использующие идею алгоритма решения задачи Джонсона [2-3]. Положить i равным 1. Перейти к Шагу 7.

Шаг 7. Произвести «склеивание» расписаний смежных по обработке групп деталей на всех производственных участках предприятия для i -го по определенному на Шаге 6 порядку сборки изделия. Переход к Шагу 8.

Шаг 8. Проверить, для всех ли изделий произведено «склеивание» расписаний смежных по обработке групп деталей. Если «склеены» расписания обработки групп деталей для всех изделий, то построение расписания работ завершается. В противном случае i полагается равным $i + 1$ и следует переход к пункту 7.

Прототип разрабатываемой программы был первоначально написан с использованием платформы Microsoft .Net Framework 3.5, в которой напрямую не поддерживаются параллельные вычисления. Затем этот прототип был перенесен под .Net Framework 4.0, и, в ключевых моментах интенсивных вычислений, были применены методики параллельного программирования. Сравнительный анализ прогона тестовых примеров на 2-х ядерном процессоре показал прирост производительности в 1.4 раза для задач небольшой размерности и в 1.9 раз для задач большой размерности.

6. Заключение

В работе предлагаются распараллеливаемые алгоритмы построения планов и расписаний работ предприятия, которые могут быть детализированы до обработки отдельных деталей.

Построение подобных планов позволит осмысленно управлять работой таких сложных систем, какими являются машиностроительные предприятия, что, несомненно, будет способствовать повышению их конкурентоспособности. Последнее является особенно важным в современных условиях ужесточения конкурентной борьбы.

Как показали вычислительные эксперименты, проведенные с построенными алгоритмами, распараллеливание вычислений позволяет значительно сократить время вычислений и эффективно строить расписания обработки при большом количестве комплектующих деталей и собираемых изделий. Это в свою очередь позволит существенно повысить эффективность управления на уровне предприятия.

Литература

1. Куняев М.С., Фирсов А.С., Хоботов Е.Н. Об одном подходе к построению системы планирования работ на машиностроительном предприятии // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». – 2009. № 4. - С. 91-102.
2. Хоботов Е.Н. О некоторых моделях и методах решения задач планирования в дискретных производственных системах // АиТ. - 2007. - № 12. - С. 85-100.
3. Jain A.S., Meeran S. Theory and Methodology. Deterministic job-shop scheduling: Past, present and future // European Journal of Operational Research 113, (1999), pp. 390-434.