

© 2012 г. Е.Н. ХОБОТОВ, д-р техн. наук
(Институт проблем управления
им. В.А. Трапезникова РАН, Москва)

ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ В ЗАДАЧАХ ПОСТРОЕНИЯ РАСПИСАНИЙ РАБОТ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ С УЧЕТОМ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ СБОРОК

Рассматриваются алгоритмы построения расписания обработки комплектующих деталей, а также сборки из них узлов, агрегатов и сложных изделий. В основу предлагаемых алгоритмов для сокращения времени построения расписаний обработки и сборки узлов, агрегатов и выпускаемых изделий положена идея распараллеливания вычислений.

**PARALLEL COMPUTING IN THE TASK OF
CONSTRUCTING SCHEDULE FOR THE ENTERPRISES
ADJUSTED INTERIM BUILDS** / E.N. Hobotov (V.A. Trapeznikov
Institute of Control Sciences, Profsoyuznaya 65, Moscow, 117342, Russia,
E-mail: e_khobotov@mail.ru). Algorithms for a schedule of processing
of component parts and assemblies of these components, assemblies and
complex products. The proposed algorithm to reduce the time a schedule
of processing and assembly units, assemblies and manufactured products
on the idea of parallel computing.

1. Введение

Проблемам планирования и построения расписаний работ, а также разработке систем планирования в настоящее время уделяется повышенное внимание, которое вызвано возможностью заметного повышения эффективности производств с использованием таких систем. Однако большинство существующих методов и систем планирования и построения расписаний работ позволяют решать эти задачи только на уровне производственных участков и цехов [1-3], хотя на основе таких расписаний не всегда удается построить даже удовлетворительные планы и расписания работ на уровне предприятия [4-6].

Методы, предназначенные для построения планов и расписаний работ в цехах и производственных участках, не позволяют строить планы и расписания работ на уровне предприятий, в состав которых входит несколько цехов, производственных систем и участков, из-за большой размерности и сложности возникающих задач. Кроме того, построение расписаний на уровне предприятий значительно усложняет необходимость проведения сборок комплектующих узлов и агрегатов, которые выполняются в механо-сборочных цехах предприятия, а также выбор порядка сборки выпускаемой продукции.

Причем выбор порядка сборок оказывает существенное влияние как на порядок обработки комплектующих деталей для этих сборок, так и на общее время выполнения производственных программ.

В связи с этим возникает необходимость создания новых методов, позволяющих строить согласованные планы работ для всех производственных подразделений предприятия, включая механосборочные цеха и участки.

В данной работе рассматриваются методы, позволяющие строить планы и расписания работ на уровне предприятий, в которых наряду с механообработкой комплектующих деталей может производиться также сборка различных узлов и агрегатов, используемых при изготовлении готовой продукции. Кроме того, разработаны алгоритмы, позволяющие при расчетах на многопроцессорных вычислительных средствах распараллеливать вычисления и за счет этого значительно сокращать время построения таких планов и расписаний работ.

2. Постановка задачи

Рассмотрим постановку задачи построения расписания работ на машиностроительном предприятии.

Пусть имеется «портфель заказов», содержащий известное количество изделий различных типов, которые должны быть последовательно изготовлены на предприятии, имеющем ряд механообрабатывающих цехов и механосборочных цехов, а также сборочный цех, в котором производится сборка выпускаемой продукции, состоящей из изделий n типов. В механообрабатывающих цехах производится только механообработка комплектующих деталей, а в механосборочных цехах наряду с механообработкой деталей производится сборка узлов различных типов, которые поступают в сборочный цех для изготовления готовой продукции.

Для каждого изделия, входящего в этот «портфель заказов», известен состав комплектующих его деталей, узлов и агрегатов, последовательность и время установки всех деталей, узлов и агрегатов в собираемое изделие. Узлы каждого типа собираются только в одном механосборочном цеху, т.е. в каждом механосборочном цеху собираются только «свои» узлы. Для каждого узла любого изделия известны, кроме размера собираемой партии, комплектующие его детали, время и последовательность установки деталей в собираемый узел, а также время переналадки оборудования участка для сборки узлов следующего типа. Сборка узлов производится на рабочих местах сборочных участков в механосборочных цехах. Сборка каждого узла может начаться только после завершения обработки всех комплектующих деталей для этого узла.

Для всех комплектующих деталей производимых изделий известно оборудование предприятия, используемое для обработки каждой из деталей, время и последовательность обработки детали на всем используемом оборудовании предприятия, а также все времена переналадок этого оборудования.

Для сформированной производственной программы требуется построить план и расписание работ по их выпуску и соответственно по обработке комплектующих их деталей и сборке узлов. Для построения расписания работ требуется определить порядок и времена начала и окончания сборки каждого изделия в сборочном цеху, определить порядок и времена начала и окончания обработки каждой детали на всем используемом оборудовании, порядок и времена начала и окончания сборки каждого узла и агрегата.

Порядок сборки изделий и обработки комплектующих деталей и сборки узлов требуется выбрать таким образом, чтобы по возможности сократить общее время изготовления производственной программы.

С использованием традиционных методов, как уже отмечалось выше, не удается строить даже удовлетворительные планы на уровне предприятий [4-6]. Это связано с большой размерностью и сложной структурой возникающих задач, поскольку на машиностроительных заводах может быть значительное количество цехов, производственных участков и может обрабатываться до нескольких миллионов деталей.

Наличие промежуточных сборок узлов и агрегатов значительно усложняет задачу построения расписания работ и требует для ее решения создания специальных методов. Кроме того, как оказалось [5], от порядка промежуточных сборок узлов и агрегатов, а также от порядка сборки изделий из производственной программы предприятия существенно зависит длительность изготовления производственной программы предприятия.

3. Принципы построения алгоритмов решения

Как уже отмечалось выше, для построения планов работы на уровне предприятий в [4] предлагалось использовать идею агрегирования информации и формировать «укрупненное» или «каркасное» расписание обработки групп деталей каждого изделия. Эта идея состоит в формировании групп деталей, в которых каждая деталь группы проходит при своей обработке производственные подразделения предприятия в одном порядке. Такие группы рассматриваются как обобщенные детали, а производственные подразделения предприятия, как обобщенные станки.

Времена обработки каждой группы деталей на всех производственных подразделениях, где эта группа обрабатывается, определяются в предположении, что все детали группы и оборудование участка доступны в начальный момент времени. Необходимость такого предположения вызвана тем, что порядок обработки групп деталей еще не определен и поэтому неизвестны времена освобождения оборудования участка от обработки деталей предыдущей группы. Для определения времени обработки группы деталей могут использоваться как традиционные методы построения расписаний [1-3], так и оценочные модели [4]. На рис. 1 приведено расписание обработки i -й группы деталей в l -м производственном подразделении и обозначено время этой обработки T_{il} .

Времена обработки каждой из таких групп деталей в производственных подразделениях вычисляются независимо друг от друга и могут вычисляться одновременно на различных процессорах многопроцессорных вычислительных средств. Это позволяет существенно сократить время построения планов и расписаний работ на уровне предприятий.

После определения времени обработки всех групп деталей во всех производственных подразделениях с помощью традиционных методов построения расписаний работ может быть построено расписание обработки обобщенных деталей на обобщенных станках, т. е. обработки сформированных групп деталей в производственных подразделениях предприятия. Временем обработки обобщенной детали i на обобщенном станке l считается время T_{il} , затраченное на обработку i -й группы деталей на l -м производственном участке, а последовательность обработки таких обобщенных деталей на обобщенных станках определяется последовательностью обработки соответствующих групп деталей на производственных участках предприятия. В [4] такое расписание названо

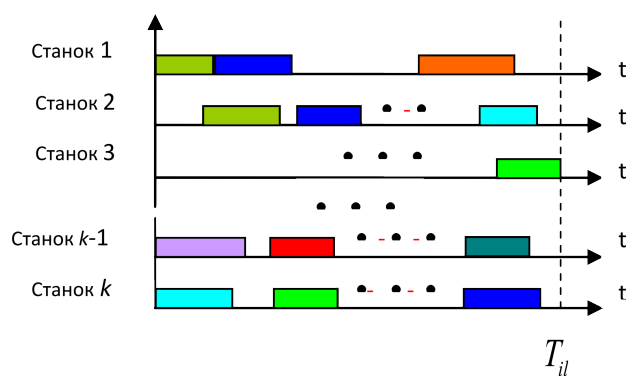


Рис. 1. Диаграмма Гантта для расписания обработки i -й группы деталей в l -м производственном подразделении.

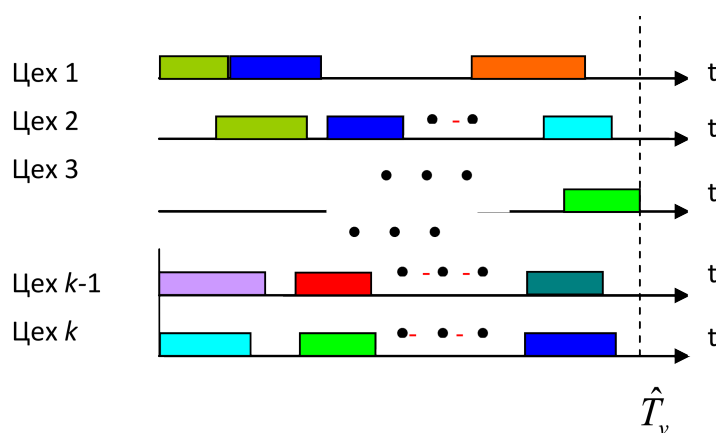


Рис. 2. Диаграмма Гантта «каркасного» расписания для изготовления комплектующих v -го изделия.

«каркасным» и для обработки и сборки комплектующих v -го изделия на предприятии представлено на рис. 2, где через \hat{T}_v обозначено затраченное на это время.

Наборы прямоугольников, расположенных вдоль осей, соответствующих производственным участкам, показывают последовательность, длительность и времена начала и окончания обработки каждой группы деталей на производственных участках предприятия. Время окончания обработки последней группы комплектующих деталей v -го изделия T_v , и является временем завершения производства комплектующих для этого изделия.

Построение «каркасных» расписаний не вызывает значительных затруднений, поскольку количество групп деталей и производственных подразделений на предприятии, как правило, не бывает большим. Если же на некоторых предприятиях количество подобных групп деталей или производственных подразделений окажется слишком большим, то в качестве обобщенных станков могут быть выбраны группы производственных подразделений. Этот прием позволяет [4] существенно сокращать размерность задачи построения «каркасных» расписаний работы, но увеличивает время его «развертывания» до расписания обработки отдельных деталей.

Очень часто для сокращения сроков и затрат на выполнение заказов комплектующие детали для собираемых изделий 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.

В таких случаях при построении «каркасных» расписаний все партии комплектующих деталей каждого этапа сборки также распределяются по группам. Распределение деталей по группам осуществляется по таким же признакам, как было описано выше, т. е. все детали одной группы при своей обработке должны в одной последовательности проходить одни и те же производственные системы и участки предприятия. После формирования таких групп по описанной выше схеме строится «каркасное» расписание обработки комплектующих.

Весьма важным фактором, который значительно усложняет задачу построения расписания работ и требует для ее решения создания специальных методов, при изготовлении многих изделий является наличие промежуточных сборок узлов и агрегатов. Кроме того, как оказалось, от порядка промежуточных сборок узлов и агрегатов, а также от порядка сборки изделий существенно зависит длительность изготовления производственной программы предприятия.

В связи с этим рассмотрим задачу определения последовательности сборки узлов и определим условия, позволяющие формировать последовательность их сборки, обладающую в смысле агрегированного представления расписания работ свойством оптимальности.

Пусть требуется собрать несколько типов узлов, состоящих не из очень большого количества комплектующих деталей, так что сборку таких узлов начинают, когда все комплектующие для этого узла уже обработаны. Известны времена сборки каждого узла, а также времена обработки и переналадки используемого оборудования для каждой комплектующей детали любого узла с последовательностью их обработки. Все используемое оборудование и заготовки комплектующих деталей для всех узлов в начальный момент доступны для работы.

Требуется определить последовательность изготовления узлов, при которой время изготовления узлов будет минимальным.

Решение данной задачи вызывает значительные затруднения, поскольку при различной последовательности сборки узлов время обработки комплектующих деталей для одного и того же узла может быть разным.

Кроме того, практически на всех промышленных предприятиях постоянно возникают ситуации, когда на одних единицах оборудования цехов и участков заканчивается обработка комплектующих для одних узлов и изделий, а на освободившихся единицах оборудования этих же цехов и участков уже ведется обработка комплектующих для других узлов или изделий. Поэтому весьма сложно, а часто и невозможно выделить моменты, когда заканчивается обработка комплектующих для одного узла и начнется обработка комплектующих для других узлов.

Весьма хорошие результаты в этом случае могут быть получены при использовании агрегирования информации и «каркасного» представления расписаний. Расписание, в

котором в качестве «каркасов» рассматриваются процессы изготовления комплектующих и сборки из них узлов, агрегатов или выпускаемых изделий назовем «каркасным» расписанием изготовления узлов, агрегатов или выпускаемых изделий соответственно. Время, которое требуется для изготовления комплектующих узла, агрегата или выпускаемого изделия от начала работ в нулевой момент и до их завершения, будем называть временем изготовления «каркаса» комплектующих.

Тогда условия, определяющие порядок сборки узлов, гарантирующий минимальную длительность «каркасного» расписания их изготовления, могут быть сформулированы в следующей теореме.

Теорема 1. Пусть требуется изготовить несколько типов узлов, сборка каждого из которых начинается после обработки всех комплектующих деталей для данного узла. Перед сборкой каждого узла обрабатываются только комплектующие детали этого узла.

Тогда при одновременной доступности всех работ «каркасное» расписание, которое минимизирует общее время изготовления всех узлов, таково, что сборка j -го по порядку изготовления узла предшествует сборке узла $j + 1$, если $\min(A_{[j]}, B_{[j+1]}) \leq \min(A_{[j+1]}, B_{[j]})$ и $A_{[j+1]} \neq B_{[j+1]}$.

Если $A_{j+1} = B_{j+1}$ и имеется k ($k = 1, \dots, n$) следующих за ней работ по изготовлению узлов, для которых также выполняются равенства $A_{j+k+1} = B_{j+k+1}$, то для этих работ кроме выполнения условий $\min(A_{j+k}, B_{j+k+1}) \leq \min(A_{j+k+1}, B_{j+k})$ для всех k ($k = 0, \dots, n$) должно также выполняться условие $\min(A_j, B_{j+n+1}) \leq \min(A_{j+n+1}, B_j)$, где через $j + n + 1$ обозначена первая работа, следующая за работой $j + n$, и для которой $A_{j+n+1} \neq B_{j+n+1}$.

Здесь A_j – время изготовления «каркаса» комплектующих деталей j -го узла, B_j – время сборки j -го узла, $A_{[j]}$ – время изготовления «каркаса» комплектующих деталей j -го по порядку изготовления узла, $B_{[j]}$ – время сборки j -го по порядку изготовления узла.

Доказательство данной теоремы аналогично доказательству теоремы Джонсона [7-8], и поэтому здесь не приводится.

Рассмотрим теперь задачу определения последовательности сборки сложных узлов, агрегатов и выпускаемых изделий и сформулируем условия, позволяющие определять последовательность их сборки, являющуюся в смысле агрегированного представления расписаний работ оптимальной.

Под сложными узлами, агрегатами и выпускаемыми изделиями здесь понимаются такие устройства, которые начинают собирать, когда еще не все их комплектующие изготовлены. Это связано с тем, что количество таких комплектующих часто оказывается весьма большим и их очень сложно и дорого хранить. Кроме того, время изготовления сложных узлов, агрегатов или выпускаемых изделий в тех случаях, когда сначала изготавливаются комплектующие и лишь после этого производится их сборка, часто оказывается неоправданно большим.

В таких случаях процесс сборки сложных узлов, агрегатов и выпускаемых изделий организуют так, чтобы по возможности сократить количество и длительность пауз на ожидание комплектующих, но при этом и сократить время "пролеживания" деталей в ожидании их использования при сборке изделий. Это связано с тем, что во многих случаях комплектующие должны быть установлены в собираемые узлы, агрегаты и изделия в течение определенного времени, иначе их необходимо "консервировать что

Мех. обр.	$A_{[1]}$	$D_{[1]}$	$Z_{[2]}$	$A_{[2]}$	$D_{[2]}$	$A_{[3]}$	$D_{[3]}$
Сборка	$X_{[1]}$	$D_{[1]}$	$B_{[1]}$	$D_{[2]}$	$B_{[2]}$	$X_{[3]}$	$D_{[3]}$	$B_{[3]}$...

Рис. 3. Диаграмма Ганта «каркасного» расписания изготовления узлов.

требует дополнительного времени и затрат.

Поэтому процесс сборки сложных узлов, агрегатов и особенно изделий обычно разделяют по времени на этапы. Разделение на этапы производится таким же образом, как это было описано выше, т. е. чтобы комплектующие, которые должны использоваться на сборке во время текущего этапа, могли быть изготовлены на предыдущем этапе [5], а комплектующие, необходимые для сборки на следующем этапе, могли быть изготовлены в течение текущего этапа и т. д.

Перед началом сборки таких узлов или изделий производится изготовление комплектующих, обеспечивающих на следующем этапе сборку и продолжение изготовления комплектующих. После завершения изготовления комплектующих еще некоторое время продолжается их установка в собираемый узел или изделие.

Процесс изготовления такого узла или изделия удобно представлять с использованием «каркасного» расписания, в котором предварительное изготовление комплектующих узла или изделия i -го типа представляется «каркасом» длительностью A_i , одновременная сборка и продолжение изготовления комплектующих представляется «каркасами», имеющими одинаковую длительность D_i , а завершающая сборка – «каркасом» длительностью B_i .

«Каркасное» расписание, представляющее процесс изготовления узлов или выпускаемых изделий, в достаточно общем случае имеет вид, показанный на рис. 3. В таком расписании время изготовления «каркасов» комплектующих узла или изделия i -го типа будет равно $A_i + D_i$, а время сборки этого узла или изделия будет равно $D_i + B_i$.

Здесь через $X_{[i]}$ обозначено время ожидания комплектующих при сборке i -го по порядку изготовления изделия, через $Z_{[i]}$ – время ожидания перед началом изготовления комплектующих для сборки i -го по порядку изготовления изделия. О способах и методах вычисления величин A_i , B_i и D_i будет сказано далее.

Рассмотрим теперь условия, позволяющие определять оптимальный порядок построения «каркасного» расписания сборки узлов или выпускаемых изделий.

Теорема 2. Пусть требуется изготовить n типов сложных узлов, агрегатов или изделий, сборка каждого из которых производится по описанной выше схеме. Времена A_i , B_i и D_i для каждого узла, агрегата или изделия известны. Тогда при одновременной доступности всех работ и оборудования последовательность изготовления узлов, агрегатов или изделий, которая минимизирует максимальную длительность «каркасного» расписания изготовления всех узлов, такова, что сумма

$$\sum_{i=1}^{n-1} \max(A_{[i+1]} - B_{[i]}, 0) + A_{[1]}$$

достигает минимального значения.

Здесь индекс в квадратных скобках, как и выше и в [7], обозначает порядок сборки узла, агрегата или изделия.

Доказательство. Если обозначить через $F_{max}(S)$ длительность изготовления n изделий для конкретного расписания S , то, как видно из приведенной выше диаграммы Гантта (рис. 3), величина $F_{max}(S)$ будет равна:

$$F_{max}(S) = \sum_{i=1}^n (D_{[i]} + B_{[i]}) + \sum_{i=1}^n X_{[i]},$$

где $X_{[i]}$ – простой сборочного цеха в ожидании комплектующих, а индекс в квадратных скобках обозначает очередности выполнения работ и простоев.

Значения $X_{[i]}$ могут быть выражены через $A_{[i]}$, $D_{[i]}$ и $B_{[i]}$ следующим образом:

$$\begin{aligned} X_{[1]} &= A_{[1]}, X_{[2]} = \max(A_{[1]} + D_{[1]} + Z_{[2]} + A_{[2]} - B_{[1]} - D_{[1]} - X_{[1]}, 0) = \\ &= \max(A_{[1]} + Z_{[2]} + A_{[2]} - B_{[1]} - X_{[1]}, 0), \end{aligned}$$

и, учитывая равенства $Z_{[2]} = \max(B_{[1]} - A_{[2]}, 0)$, а $X_{[1]} = A_{[1]}$, получаем, что $X_{[2]} = \max(A_{[2]} - B_{[1]}, 0)$, т. е. $X_{[2]}$ может быть отличным от нуля только в том случае, когда $Z_{[2]} = 0$.

$$\begin{aligned} X_{[3]} &= \max(A_{[1]} + D_{[1]} + Z_{[2]} + A_{[2]} + D_{[2]} + Z_{[3]} + A_{[3]} - \\ &- B_{[1]} - D_{[1]} - B_{[2]} - D_{[2]} - X_{[1]} - X_{[2]}, 0) = \\ &= \max(A_{[1]} + Z_{[2]} + A_{[2]} + Z_{[3]} + A_{[3]} - B_{[1]} - B_{[2]} - X_{[1]} - X_{[2]}, 0), \end{aligned}$$

и, учитывая, как и в предыдущем случае, равенства $Z_{[2]} = \max(B_{[1]} - A_{[2]}, 0)$, $X_{[1]} = A_{[1]}$, $Z_{[3]} = \max(B_{[2]} - A_{[3]}, 0)$, получаем, что $X_{[3]} = \max(A_{[3]} - B_{[2]}, 0)$.

В общем случае для любого $X_{[j]}$ при $2 \leq j \leq n$ можно написать:

$$X_{[j]} = \max(A_{[j]} - B_{[j-1]}, 0).$$

Определим теперь частные суммы:

$$\begin{aligned} X_{[1]} &= A_{[1]}, X_{[1]} + X_{[2]} = \max(A_{[2]} - B_{[1]}, 0) + A_{[1]}, \\ X_{[1]} + X_{[2]} + X_{[3]} &= A_{[1]} + \max(A_{[2]} - B_{[1]}, 0) + \max(A_{[3]} - B_{[2]}, 0). \end{aligned}$$

Для любой частной суммы при $j \leq n$ можно записать:

$$\sum_{i=1}^j X_{[i]} = \sum_{i=1}^{j-1} \max(A_{[i+1]} - B_{[i]}, 0) + A_{[1]}.$$

Тогда длительность расписания $F_{max}(S)$ определяется следующим образом:

$$F_{max}(S) = \sum_{i=1}^n (B_{[i]} + D_{[i]}) + \sum_{i=1}^n X_{[i]} = \sum_{i=1}^n (B_{[i]} + D_{[i]}) + \sum_{i=1}^{n-1} \max(A_{[i+1]} - B_{[i]}, 0) + A_{[1]}.$$

Для определения минимального по времени «каркасного» расписания необходимо выбрать такой порядок изготовления узлов, чтобы минимизировать сумму простоев

$\sum_{i=1}^{n-1} \max(A_{[i+1]} - B_{[i]}, 0) + A_{[1]}$, поскольку величина $\sum_{i=1}^n (B_{[i]} + D_{[i]})$ не зависит от порядка изготовления узлов. Теорема доказана.

Таким образом, теоремы 1 и 2 позволяют определять порядок изготовления узлов, агрегатов и выпускаемых изделий. Для определения таких порядков требуется определять времена изготовления «каркасов» комплектующих. Причем вычисление времени «каркасов» комплектующих для каждого узла, агрегата и выпускаемого изделия может производиться независимо друг от друга, что позволяет организовать их параллельное вычисление на различных процессорах в многопроцессорных вычислительных средствах. Благодаря этому можно существенно сократить время построения планов и расписаний работ на уровне предприятий.

4. Принципы распараллеливания алгоритмов построения расписаний

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

Как уже отмечалось выше, для построения расписаний работ на уровне предприятий в [4] предлагалось строить «каркасные» расписания работ. Для их построения все партии комплектующих деталей каждого этапа сборки должны быть распределены по группам, детали которых в одной последовательности проходят производственные участки предприятия. Кроме того, должны быть определены времена обработки деталей каждой группы на этих участках.

Времена обработки деталей каждой группы на производственных участках предприятия могут быть определены либо с использованием оценочных моделей [4], либо путем построения расписания обработки этой группы деталей на соответствующем участке. 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.

Наличие промежуточных сборок узлов и агрегатов значительно усложняет задачу построения расписания работ. Однако и в этом случае идеи агрегирования и построения «каркасных» расписаний оказываются весьма плодотворными.

Рассмотрим алгоритм построения расписаний работ по обработке комплектующих их деталей и сборке из них узлов для некоторого этапа сборки изделий. Предлагаемый алгоритм по шагам может быть представлен в следующем виде.

Шаг 1. Производится распределение деталей, которые должны обрабатываться на текущем этапе сборки изделий, по группам. В каждую группу входят детали, имеющие один и тот же порядок обработки на производственных участках предприятия. Для деталей, комплектующих узлы, маршрут обработки считается законченным в механосборочном цехе, в котором из этих деталей собирается соответствующий узел. Следует переход к Шагу 2.

Шаг 2. Определяются времена обработки сформированных групп деталей и продолжительность сборки из них узлов во всех механосборочных цехах и участках предприятия. Эти времена могут определяться независимо друг от друга и, поэтому могут вычисляться на различных процессорах, если для расчетов используются многопро-

цессорные вычислительные средства. Следует переход к Шагу 3.

Шаг 3. С использованием собранной на Шагах 1 и 2 информации строится «каркасное» расписание обработки комплектующих деталей и сборкой из них узлов на всех участках предприятия. Порядок прохождения цехов и производственных участков предприятия каждой сформированной на Шаге 1 группой деталей известен из правила распределение деталей по группам. Для построения таких расписаний, как уже отмечалось выше, могут быть использованы традиционные методы построения и представления расписаний обработки деталей. Следует переход к Шагу 4.

Шаг 4. Для всех механосборочных цехов, в которых производится сборка узлов и агрегатов, определяется порядок их сборки с использованием результатов теорем 1 или 2. Для этого определяются времена «каркасов» изготовления комплектующих и сборки из них узлов и агрегатов. Эти времена могут определяться независимо друг от друга и, поэтому могут вычисляться на различных процессорах, если для расчетов используются многопроцессорные вычислительные средства. Следует переход к Шагу 5.

Шаг 5. По максимальному времени завершения либо обработки последней комплектующей детали, либо сборки последнего узла определяется время окончания подготовки комплектующих деталей и узлов для следующего этапа сборки изделия. Переход к Шагу 6.

Шаг 6. Производится проверка этапа сборки изделия. Если следующий этап сборки является последним, то определяется время изготовления комплектующих изделия и следует переход к Шагу 8. В противном случае следует переход к Шагу 7.

Шаг 7. По спецификации собираемых изделий формируется информация о деталях и узлах, которые должны быть обработаны и собраны для следующего этапа сборки изделий. Следует переход к Шагу 1 для построения расписания изготовления комплектующих деталей и узлов на следующем этапе.

Шаг 8. Производится проверка изделия. Если изделие является последним в производственной программе, то следует переход к Шагу 9. В противном случае по спецификации собираемых изделий формируется информация о деталях и узлах, которые должны быть обработаны и собраны для первого этапа сборки следующей группы изделий. Следует переход к Шагу 1 для построения расписания изготовления этих деталей и узлов.

Шаг 9. По времени изготовления комплектующих и сборки из них изделий в соответствии с результатами теоремы 2 определяется порядок изготовления изделий, минимизирующий длительность «каркасного» расписания изготовления производственной программы. Производится «склеивание» расписаний работ изготовления смежных изделий. Формируется отчет с планами и расписаниями работ по выполнению производственной программы. Вычисления прекращаются.

Для проверки работоспособности предложенных алгоритмов и программного прототипа системы был проведен ряд вычислительных экспериментов, показавших их достаточно высокую эффективность. Например, для решения задачи со 100 станками в 5 цехах и 6 сборочными участками, 26 изделиями с общим количеством деталей 127936, техпроцесс обработки которых состоял из 4-10 операций, потребовалось около 30 минут на двухъядерном процессоре. Задача построения расписания обработки с общим числом деталей 259187 для 64 изделий (4-10 технологических операций каждая) была решена на 4-х ядерном процессоре за 55 минут.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зак Ю.А.* Прикладные задачи теории расписаний и маршрутизации перевозок. М.: Книжный дом «Либроком», 2011.
2. *Brucker P.* Scheduling Algorithms. Leipzig: Springer – 2007.
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.
4. *Хоботов Е.Н.* О некоторых моделях и методах решения задач планирования в дискретных производственных системах // *АиТ.* 2007. №12.
5. *Сидоренко А. М., Хоботов Е.Н.* Планирование производств с параллельной сборкой изделий. Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». – 2009. № 3.
6. *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.
7. *Конвей Р.В., Максвелл В.А., Миллер Л.В.* Теория расписаний. М.: Наука, 1975.
8. *Хоботов Е.Н.* Некоторые замечания к теореме Джонсона // *АиТ.* 1995. № 10.