

© 2019 г. Е.Н. ХОБОТОВ, д-р техн. наук (e_khobotov@mail.ru)
(Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва),
М.А. ЕРМОЛОВА, канд. техн. наук (ermolova.88@mail.ru)
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)

АГРЕГИРОВАНИЕ В ЗАДАЧАХ ПОСТРОЕНИЯ РАСПИСАНИЙ РАБОТ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ С КОНВЕЙЕРНОЙ СБОРКОЙ ГОТОВОЙ ПРОДУКЦИИ

Рассматриваются задачи и методы построения расписаний работ на предприятиях машиностроения, в производственных подразделениях которых производится изготовление комплектующих, а сборка выпускаемых из них изделий производится на конвейерах. Расписания работ строятся как в условиях поступающих заказов на выпускаемую продукцию, так и в условиях имеющегося на нее спроса и стоимости хранения на складах предприятия до момента реализации.

Ключевые слова: планирование, методы агрегирования, обработка деталей, конвейерная сборка изделий, узлы, агрегаты, дискретное производство, склады, управление запасами.

DOI: 10.1134/S000523101905009X

1. Введение

В [1] для повышения эффективности в деятельности предприятий машиностроения было предложено строить согласованные между собой планы и расписания работ по изготовлению комплектующих для всех подразделений предприятия. Такие планы и расписания работ в дальнейшем будем называть планами и расписаниями работ на уровне предприятий. Необходимость их построения вызвана тем, что из планов и расписаний работ отдельных подразделений, систем и участков, пусть и весьма удачных, не всегда удается сформировать даже удовлетворительные планы работы предприятий [1–3].

Для построения планов и расписаний работ на уровне предприятий в [1] был предложен подход, основанный на использовании методов агрегирования информации. В [4, 5] были предложены методы, позволяющие наряду с порядками обработки комплектующих деталей в производственных подразделениях предприятий определять как порядок сборки выпускаемых изделий, так и порядок изготовления комплектующих их узлов и агрегатов.

Однако в этих работах не исследовались методы построения расписаний работ для предприятий, в которых сборка выпускаемых изделий производится на конвейерах, хотя в промышленности имеется значительное количество предприятий такого типа, особенно в автомобилестроительной. Кроме того, особенности производства на подобных предприятиях позволяют создавать более эффективные алгоритмы построения согласованных планов и расписания работ.

В данной работе предлагаются новые принципы организации производства для предприятий, в которых выпускаемые изделия собираются на конвейерах. Показано, что в условиях предлагаемой организации производства появляется возможность строить согласованные планы и расписания работ для всех производственных подразделений таких предприятий, а также в соответствии с построенным расписанием работ определять порядок и время транспортировки комплектующих между производственными подразделениями в процессе их изготовления.

2. Постановки задач

Рассмотрим более подробно постановки задач, для решения которых предназначены предлагаемые методы.

Пусть предприятие с дискретным характером производства, имеет в своем составе R механообрабатывающих, а также \tilde{R} механосборочных цехов, в которых наряду с механообработкой деталей производится сборка узлов и агрегатов разных типов для изготавливаемых на предприятии изделий L типов. Изделия изготавливаются партиями, размеры которых N_l ($l = 1, \dots, L$) задаются на каждый интервал планирования, составляющий обычно месяц.

Для любого изделия известны типы и количество комплектующих его деталей, узлов и агрегатов каждого типа. Известны времена и последовательность изготовления каждой комплектующей детали для изделия любого типа на всем используемом оборудовании предприятия, а также времена переналадки оборудования для их изготовления.

Информация об узлах, агрегатах и условиях их производства аналогична информации, используемой и описанной в [4, 5] для подобных целей. Там же приводятся условия, позволяющие определить наиболее выгодные порядки и расписания их сборки.

Для узла и агрегата каждого типа известны типы и количество комплектующих его деталей и узлов каждого типа, время и порядок сборки, а также времена сборок и переналадок оборудования участка для их сборки.

Сборка выпускаемых изделий осуществляется на одном или нескольких конвейерах из изготовленных в цехах предприятия, а также из закупленных на стороне комплектующих деталей, узлов и агрегатов. Предполагается, что имеющиеся на предприятии конвейеры имеют последовательную или параллельно-последовательную схемы.

На каждом конвейере осуществляется сборка только «своих» изделий и каждый тип изделия может собираться только на «своем» конвейере. Для каждого конвейера известна его схема и производительность по выпуску всех типов собираемых на нем изделий, количество рабочих мест при сборке любого выпускаемого изделия, а также времена и стоимость переналадки конвейера на выпуск всех партий собираемых на нем изделий.

Изделия собираются на конвейерах обычно партиями, размеры которых ограничены. Ограничения на размеры собираемых партий изделий вызваны тем, что изготовление большого количества комплектующих займет значительное время, приведет к большим простоям конвейера в ожидании их

готовности и потребует создания больших складов для их хранения, как в подразделениях предприятия, так и на рабочих местах конвейера.

Сборка любой партии изделий начинается после доставки на каждое рабочее место конвейера определенного количества комплектов комплектующих, как правило, одинакового для всех рабочих мест.

Поэтому даже изделия одного типа, если их количество большое, собираются партиями, размеры которых не превышают определенной величины. Пока на конвейере собираются изделия одной партии, на производственных подразделениях предприятия изготавливаются комплектующие для следующей партии. Если будет продолжен выпуск изделий того же типа, то конвейер не переналаживается. В противном случае производится переналадка конвейера на сборку следующей партии изделий.

Для обеспечения ритмичной работы предприятия желательно изготавливать и доставлять комплектующие на конвейер для сборки следующей партии изделий к моменту завершения его переналадки, если будут собираться изделия другого типа. В случае продолжения выпуска изделий того же типа изготовление и доставку комплектующих на конвейер следует завершать к моменту запуска на сборку последнего изделия собираемой партии. После завершения выпуска продукции одного типа конвейер переналаживается и начинается выпуск продукции следующего типа и т.д.

Расписание изготовления каждой партии комплектующих деталей для любой партии собираемых изделий однозначно определяется вектором

$$(1) \quad t(l, m, i) = \{t_{1s}(l, m, i), \dots, t_{ns}(l, m, i), \dots, t_{1\nu}(l, m, i), \dots, t_{n\nu}(l, m, i)\},$$

где $t_{1s}(l, m, i)$ – время начала обработки партии комплектующих деталей i -го типа для m -й партии изделий l -го типа на первом оборудовании по технологическому маршруту обработки этой детали в s -м производственном подразделении предприятия, на котором начинается обработка деталей этого типа, $t_{ns}(l, m, i)$ – время начала обработки партии комплектующих деталей i -го типа на последнем используемом оборудовании этого подразделения, $t_{1\nu}(l, m, i)$ – время начала обработки партии комплектующих деталей i -го типа для m -й партии изделий l -го типа на первом оборудовании по технологическому маршруту обработки этой детали в ν -м производственном подразделении предприятия, на котором завершается обработка деталей этого типа, $t_{n\nu}(l, m, i)$ – время начала обработки партии комплектующих деталей i -го типа на последнем используемом оборудовании этого подразделения.

Времена $t_{1s}(l, m, i), \dots, t_{ns}(l, m, i), \dots, t_{1\nu}(l, m, i), \dots, t_{n\nu}(l, m, i)$ являются переменными задачи построения расписания изготовления деталей, которые нужно определить в процессе решения.

Вектор $m(i, l) = \{k_{sil_1}, \dots, \tilde{k}_{sil_n}, \dots, \hat{k}_{\nu il_1}, \dots, \bar{k}_{\nu il_n}\}$ определяет технологический маршрут обработки комплектующей детали i -го типа для сборки изделий l -го типа на предприятии, где k_{sil_1} – номер станка в s -м производственном подразделении предприятия, на котором по технологическому маршруту начинается обработка i -х деталей для сборки изделий l -го типа, \tilde{k}_{sil_n} – номер станка в s -м производственном подразделении предприятия, на котором по технологическому маршруту заканчивается обработка i -й детали изделия

l -го типа, $\hat{k}_{\nu i l_1}$ – номер станка в ν -м производственном подразделении предприятия, на котором по технологическом маршруту начинается обработка i -й детали изделия l -го типа, $\bar{k}_{\nu i l_n}$ – номер станка в ν -м производственном подразделении предприятия, на котором по технологическому маршруту заканчивается обработка i -й детали изделия l -го типа на предприятии.

В одной из задач требуется построить расписание работ на предприятии, чтобы обеспечить выполнение поступившего заказа на изготовление определенного количества изделий разных типов по возможности за минимальное время.

Оптимизируемый функционал J для этой задачи может быть записан в следующем виде:

$$(2) \quad J = \min_T \left\{ \max_{j,l} T_{jl} \right\},$$

где переменная T_{jl} определяет время завершения сборки j -й партии изделий l -го типа ($l = 1, \dots, L$).

В другой задаче требуется построить расписание работ на предприятии, имеющем один конвейер, на котором последовательно собирается L типов изделий. При сборке любой партии изделий ее определенная часть отправляется на склад, чтобы в течение выпуска других изделий обеспечивать потребителей запасенной на складе продукцией требуемого типа до возобновления ее сборки.

Объемы выпуска и величину запасаемой продукции следует определять таким образом, чтобы в соответствии с имеющимся спросом на продукцию увеличить прибыль от ее реализации, а также сократить затраты на ее хранение и на переналадки конвейера.

Оптимизируемый функционал для этой задачи может быть записан в следующем виде [6]:

$$(3) \quad J_2 = \sum_{l=1}^L \left(\frac{C_l \bar{r}_l t_s T}{2} + \frac{\tilde{C}_{sl} T}{t_s} \right) \rightarrow \min,$$

где L – количество типов производимых изделий, C_l – стоимость хранения изделия l -го типа в единицу времени, \bar{r}_l – средний спрос на изделия l -го типа в течение интервала планирования T , t_s – время между началом смежных выпусков изделий одного типа на конвейере, \tilde{C}_{sl} – стоимость переналадки конвейера для сборки изделий l -го типа.

Здесь следует отметить, что для построения более точных и обоснованных планов работы предприятий предлагается сначала строить расписания работ по выполнению поступившего задания или заказов, а затем на основе построенных расписаний работ и определения времени их завершения формировать обоснованные планы работы предприятия.

3. Принципы и методы построения планов и расписаний работ

Рассмотрим сначала принципы построения планов и расписаний изготовления комплектующих, из которых на конвейере предприятия собираются

партии изделий L разных типов. Количество изделий в каждой собираемой партии будем считать известным.

Как уже отмечалось выше, планы и расписания работ для повышения эффективности функционирования предприятий следует строить для всех подразделений предприятия таким образом, чтобы они были согласованными между собой, т.е. осуществлять планирование и построение расписаний по изготовлению комплектующих на уровне предприятий. Для этих целей в [1] был предложен подход, основанный на использовании методов агрегирования информации.

Идея агрегирования информации состоит в формировании из деталей, подлежащих изготовлению, таких групп, в которых каждая деталь группы проходит при своей обработке производственные подразделения предприятия в одном порядке. При этом любая деталь группы может обрабатываться в каждом подразделении предприятия, где она изготавливается, по «своему» технологическому маршруту.

Такие группы рассматриваются как обобщенные детали, производственные подразделения предприятия – как обобщенные станки, а задача построения расписания работ на предприятии – как задача построения расписания обработки обобщенных деталей на обобщенных станках.

В традиционной классификации задач теории расписаний [7] такая задача может быть записана в виде $n|m|G|F_{\max}$.

Действительно, количество обобщенных деталей, т.е. сформированных групп комплектующих, является конечным, что показывает n .

Их обработка производится на конечном количестве обобщенных станков, т.е. в подразделениях предприятия, что показывает m , и по маршрутам, определяемым последовательностью обработки каждой обобщенной детали, т.е. группы, на обобщенных станках, что показывает G .

При построении расписания обработки требуется минимизировать общее время изготовления деталей, что показывает F_{\max} .

Для построения такого расписания должно быть определено время обработки каждой обобщенной детали на всех используемых обобщенных станках, т.е. время обработки каждой группы деталей на тех производственных подразделениях предприятия, где эта группа обрабатывается. Времена обработки могут определяться как с использованием традиционных методов построения расписаний [7–9], так и оценочных моделей [1].

На рис. 1 приведен пример расписания обработки i -й группы деталей в l -м производственном подразделении, через T_{il} обозначено время этой обработки. После определения этих времен фактически возникает традиционная задача теории расписаний, связанная с построением расписания обработки обобщенных деталей в производственном подразделении, состоящем из обобщенных станков. Эта задача в традиционной классификации теории расписаний также может быть записана в виде $n|m|G|F_{\max}$.

В [1] подобное расписание изготовления групп деталей в подразделениях предприятия названо «каркасным». Для построения «каркасных» расписаний с успехом могут использоваться традиционные методы построения рас-

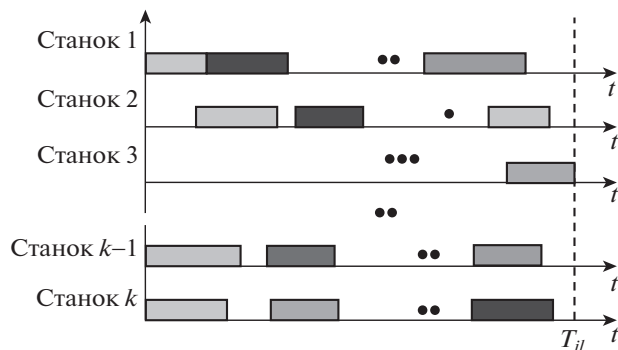


Рис. 1. Диаграмма Гантта, представляющая расписание обработки i -й группы деталей в l -м производственном подразделении.

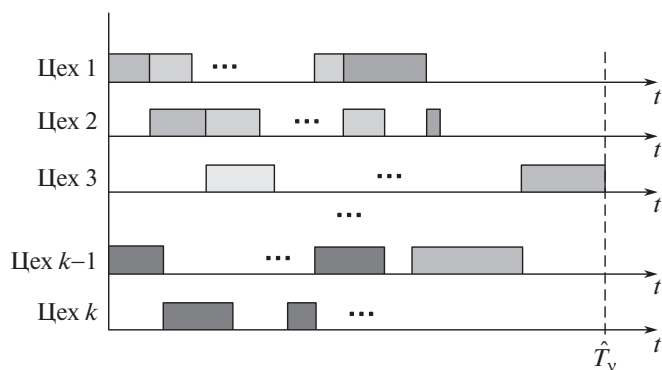


Рис. 2. Фрагмент «каркасного» расписания обработки групп деталей на уровне предприятия.

писаний [7–9], поскольку размерность задач при агрегировании значительно снижается. Пример такого расписания приведен на рис. 2.

Это расписание, как видно из рис. 2, имеет практически такой же вид, как и расписание обработки деталей в производственном подразделении, представленное на рис. 1. Однако в диаграмме Гантта, представляющей «каркасное» расписание, вместо станков по оси ординат откладываются производственные подразделения предприятия (участки, цеха), а вместо времени обработки деталей по каждой из осей абсцисс откладываются времена обработки групп деталей в соответствующих подразделениях.

Как правило, и при формировании расписаний для определения времени завершения работ, и для групп деталей в соответствующих подразделениях предприятия, и для «каркасного» расписания на уровне предприятия строится несколько разных расписаний, до 15–25, и из них выбирается лучшее.

Распределение комплектующих по таким группам на предприятиях следует производить лишь при освоении выпуска этих типов деталей и корректировать после включения в производственную программу новых комплектующих или при изменении состава оборудования производственных подразделений.

Времена обработки деталей каждой группы на производственных подразделениях предприятия могут вычисляться независимо друг от друга в любой последовательности. Поэтому на многопроцессорных вычислительных средствах можно организовать параллельные вычисления этих времен. Это позволяет заметно сократить время вычислений, что подтвердили результаты вычислительных экспериментов [4].

При построении «каркасных» расписаний предполагается, что имеющееся там оборудование используется только для изготовления деталей обрабатываемого «каркаса», а после завершения их обработки «простаивает» до поступления деталей следующего «каркаса». В реальных условиях производства простой оборудования весьма нежелателен, и для устранения таких простоев производится «склеивание» расписаний. Под «склеиванием каркасных» расписаний здесь понимается построение такого расписания, в котором оборудование, освободившееся от обработки деталей одного «каркаса», по возможности сразу же начинает использоваться для изготовления деталей следующего «каркаса». В связи с этим время выполнения производственной программы после «склеивания каркасных» расписаний может только сократиться. Это позволяет с помощью «каркасных» расписаний достаточно быстро получать оценки «сверху» на время изготовления комплектующих для сборки различных партий изделий.

Если же на некоторых предприятиях количество формируемых по указанному выше принципу групп деталей или производственных подразделений оказывается слишком большим, то в качестве обобщенных станков могут быть выбраны более крупные производственные подразделения, а в качестве обобщенных деталей – детали, которые обрабатываются в одном порядке в этих подразделениях.

Такой прием позволяет [1] существенно сокращать размерность задачи построения «каркасных» расписаний работы, но при этом увеличивается время «развертывания» «каркасного» расписания, когда требуется на его основе сформировать расписания обработки деталей на оборудовании подразделений предприятия.

4. Особенности построения планов и расписаний работ для предприятий с конвейерной сборкой изделий

Рассмотрим принципы и особенности методов построения расписаний работ на предприятиях с конвейерной сборкой изделий.

Как уже отмечалось выше, сборка любой партии изделий начинается после доставки на каждое рабочее место конвейера определенного количества комплектующих, которые предварительно были изготовлены в подразделениях предприятия.

Проведенные исследования и построенные примеры показали, что от порядка сборки партий изделий зависит и порядок обработки комплектующих, и в значительной степени общее время изготовления изделий. «Каркасное» расписание изготовления комплектующих, предназначенных для сборки любой партии изделий, в свою очередь, можно рассматривать как «каркас» из-

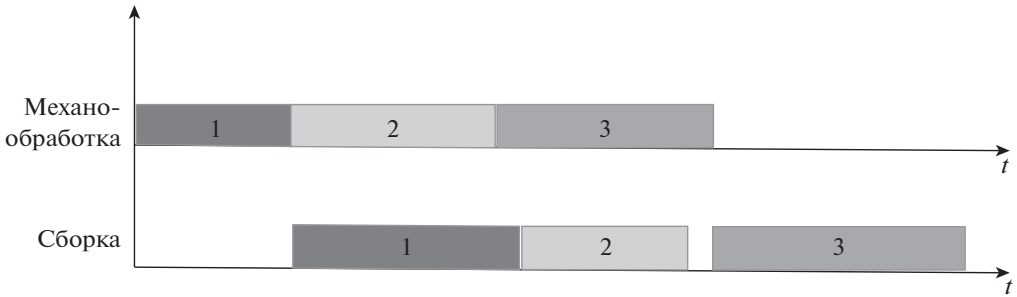


Рис. 3. Диаграмма Гантта «каркасного» расписания изготовления комплектующих и сборки из них изделий.

готовления комплектующих для этой партии в производственных подразделениях предприятия.

Такой «каркас» для каждой партии изделий имеет вид, аналогичный «каркавному» расписанию, представленному на рис. 2. Время изготовления этого «каркаса» комплектующих \hat{T}_v показано на рис. 2. Величина \hat{T}_v дает хорошую оценку «сверху» на время изготовления комплектующих для сборки соответствующей партии изделий. Время сборки любой партии изделий можно определить, зная ее размеры, количество рабочих мест на конвейере, его схему и производительность.

Будем считать, что время переналадки конвейера мало и им можно пренебречь. В этом случае, зная времена изготовления «каркасов» комплектующих и времена сборок из них партий изделий, можно построить оптимальное по времени «каркасное» расписание сборки нескольких партий различных изделий. Действительно, все комплектующие сначала обрабатываются в производственных подразделениях предприятия, а затем передаются на конвейер для сборки изделий. Если рассматривать время изготовления «каркаса» комплектующих для сборки j -й партии изделий, A_j , как время обработки j -й детали на первом станке, а время сборки этой партии изделий на конвейере, B_j , как время обработки j -й детали на втором станке, то такая задача оказывается аналогичной задаче Джонсона (рис. 3).

Последовательность сборки партии изделий и, соответственно, изготовления комплектующих для этого может быть определена с использованием результатов следующей теоремы, которая формулируется и доказывается по аналогии с теоремой Джонсона [10].

Теорема 1. Пусть на конвейере требуется собрать несколько партий изделий различных типов, сборка каждой из которых начинается после изготовления всех комплектующих для этой партии изделий. Тогда при одновременной доступности всех работ «каркасное» расписание, которое минимизирует общее время изготовления всех изделий, таково, что сборка j -й по порядку изготовления партии изделий предшествует сборке $(j + 1)$ -й, 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 партий изделий, для которых также выполняются равен-

ства $A_{j+k+1} = B_{j+k+1}$, 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, которая следует за работой $j + n$ и для которой $A_{j+n+1} \neq B_{j+n+1}$.

Однако здесь отметим, что после «склеивания каркасных» расписаний из-за «досрочного» использования освободившегося оборудования возможно возникновение ситуаций, когда длительность оптимального «каркасного» расписания окажется чуть больше длительности изготовления изделий при других порядках их сборки.

Еще хотелось бы отметить, что особенности производства на предприятиях с конвейерной сборкой выпускаемых изделий в ряде случаев позволяют существенно сократить затраты и время на построение расписаний работ по изготовлению комплектующих.

Дело в том, что изделия на предприятиях с конвейерной сборкой обычно собираются партиями, размеры которых зависят от величины поступившего заказа или спроса на продукцию. При изменении объемов заказа состав комплектующих изделий каждого типа обычно не меняется, не меняется и технология их изготовления, а меняются объемы партий комплектующих разных типов, причем пропорционально количеству производимых изделий.

Наиболее эффективными методами для построения расписаний работ в производственных подразделениях предприятий являются методы, основанные на использовании решающих правил [7, 9]. В этих методах с помощью решающих правил определяется порядок запуска деталей на обработку и на основе этого порядка строится расписание обработки комплектующих.

Определение порядка запуска деталей на обработку при использовании решающих правил осуществляется на основе сравнения подлежащих обработке партий комплектующих по количеству и типам используемого для обработки оборудования, по технологическим особенностям их обработки, связанным со временем переналадки используемого оборудования и потребностью в технологической оснастке, а также по времени их обработки.

Порядок запуска комплектующих деталей на обработку, определенный по правилам, в которых производится сравнение количества и типов используемого для их обработки оборудования, а также технологических особенностей обработки, не зависит от размеров партии изготавливаемых изделий и поэтому не может быть перестроен при их изменении.

Рассмотрим случай, когда в каждом производственном подразделении предприятия имеется оборудование различных типов, время переналадки этого оборудования для обработки комплектующих любых типов мало по сравнению со временем обработки их партии и им можно пренебречь.

Если порядок запуска комплектующих деталей на обработку определяется с помощью решающих правил, в которых производится сравнение времени изготовления партий комплектующих различных типов, то при выполнении указанных выше условий выбранный порядок не будет зависеть от размеров партий собираемых изделий.

Действительно, пусть в таком подразделении производится обработка комплектующих для сборки изделий l -го типа в количестве N_{l1} и на k -м станке ν -го подразделения и по некоторому решающему правилу партии деталей i -го типа обрабатываются перед партией деталей j -го типа.

В этом случае возможны следующие соотношения между временами обработки сравниваемых партий деталей:

1. $N_{l1}n_{il}t_{lik\nu} \leq N_{l1}n_{jl}t_{lik\nu}$ для всех или некоторых станков, на которых эти партии обрабатываются.

2. $N_{l1}n_{il}t_{lik\nu} > N_{l1}n_{jl}t_{lik\nu}$ для всех или некоторых станков, на которых эти партии обрабатываются.

Здесь через n_{il} обозначено количество деталей i -го типа, которое входит в состав изделия l -го типа, через $t_{lik\nu}$ – время обработки комплектующей детали i -го типа для l -го изделия на k -м станке ν -го подразделения предприятия, где эта деталь обрабатывается.

Из этих неравенств видно, что правая и левая их части могут быть сокращены на N_{l1} и их выполнение не будет зависеть от размера партий собираемых изделий. Поэтому порядок запуска партий комплектующих на обработку при использовании таких решающих правил также не будет меняться при изменении размера партий собираемых изделий и его не надо определять заново.

Для построения расписания обработки партий комплектующих каждой группы в подразделении можно использовать такой же порядок их запуска на обработку, при котором в этом подразделении для некоторого размера партии собираемых изделий было получено лучшее расписание изготовления комплектующих этой группы.

5. Планирование и построение расписаний работ при выполнении поступающих заказов

Рассмотрим по шагам алгоритм построения расписаний работ для предприятий, на которых сборка изделий L типов производится на одном конвейере в соответствии с поступившим заказом. Как уже отмечалось, считаем, что используемый конвейер имеет последовательную или параллельно последовательную схему.

Предлагаемый алгоритм основан на идеях и принципах, изложенных выше в разделах 3 и 4. Будем считать, что распределение комплектующих разных типов по группам в соответствии с описанными в разделе 3 принципами уже произведено и их перераспределения не требуется. В этом случае количество собираемых изделий каждого типа определяется поступившим заказом, готовая продукция по мере изготовления передается заказчикам и управление ее хранением не производится.

Шаг 1. Для изделий каждого типа из заданной производственной программы в соответствии с имеющимися на предприятии ограничениями на размеры партий, описанными в разделе 2, определяются размеры и количество партий, которыми они будут изготавливаться. Переход к шагу 2.

Шаг 2. Для каждой партии изделий на основе ее размера, т.е. количества собираемых изделий, и состава комплектующих деталей изделий определяются размеры партий комплектующих деталей, которые должны быть изготовлены для ее сборки, и времена их обработки на каждом оборудовании тех производственных подразделений предприятия, где они изготавливаются. Переход к шагу 3.

Шаг 3. С использованием времени их обработки по схеме, описанной в разделе 3, строится «каркасное» расписание изготовления комплектующих для каждой партии изделий из производственной программы обработки и по этому расписанию определяется время изготовления комплектующих для сборки каждой партии изделий. Переход к шагу 4.

Шаг 4. Для каждой партии изделий определяется время сборки. Расчеты этого времени производятся на основе информации о размере собираемой партии изделий, о схеме конвейера, о количестве мест на нем при сборке этой партии, о времени передвижения собираемого изделия между смежными рабочими местами и нормативе времени выполнения работ на рабочем месте. Поэтому эти расчеты затруднений не вызывают и здесь рассматриваться не будут. Переход к шагу 5.

Шаг 5. В соответствии с условиями теоремы 1 по длительности «каркасного» расписания, определяющего время изготовления комплектующих для каждой собираемой партии изделий, и по времени ее сборки определяется выгодный порядок изготовления сформированных партий изделий. Переход к шагу 6.

Шаг 6. В соответствии с определенным порядком изготовления комплектующих и сборки из них заказанных партий изделий строится «каркасное» расписание их изготовления и определяются времена изготовления «каркасов» комплектующих для каждой партии изделий и времена завершения их сборки. Переход к шагу 7.

Шаг 7. Производится «склеивание» расписаний изготовления комплектующих для каждой партии изделий, включая «склеивание» расписаний изготовления каждой группы комплектующих на производственных подразделениях предприятия, где эта группа обрабатывается. При необходимости такое расписание может быть «детализировано» до расписания обработки каждой детали на всем используемом для этого оборудовании. Производится также «склеивание» расписаний изготовления комплектующих для последовательно изготавливаемых партий изделий. Вычисления заканчиваются.

Следует отметить, что моменты завершения обработки на оборудовании предприятия последних комплектующих одной партии изделий определяют начало запуска на обработку комплектующих следующей партии изделий.

В случае, когда сборка изделий на предприятии производится на нескольких конвейерах, а комплектующие изготавливаются в одних и тех же подразделениях предприятия, построение «каркасного» расписания производится по следующей схеме.

Комплектующие каждой партии изделий разделяются на группы независимо от комплектующих других партий по описанным в третьем пункте правилам таким образом, что в каждую группу входят комплектующие только

для этой партии изделий, которые проходили изготовление в производственных подразделениях предприятия в одном порядке.

Это вызвано тем, что на разных конвейерах собираются партии изделий различных типов, требующие для сборки партий разное время. Как правило, работы на разных конвейерах обычно производятся независимо друг от друга, и включение в группы комплектующих для разных изделий может привести к задержкам в изготовлении комплектующих и соответственно к нежелательным простоям конвейеров.

Поэтому «каркасное» расписание изготовления комплектующих строится для каждой партии изделий отдельно, и по длительности этого расписания, а также по времени сборки партии изделий из этих комплектующих определяется порядок их изготовления.

Для этого строится укрупненное «каркасное» расписание, в котором изготовление комплектующих для каждой партии изделий во всех подразделениях предприятия представляется в виде одного «каркаса». Время сборки партии изделий на некотором конвейере тоже строится в виде одного «каркаса».

Графически такое расписание можно представить на диаграмме Гантта с использованием $k + 1$ осей, где k – количество конвейеров на предприятии. На одной оси откладываются времена изготовления «каркасов» комплектующих, а на остальных осях – времена сборки партий изделий. Для каждого конвейера используется своя ось.

Построение таких расписаний не вызывает особых затруднений, и для этих целей могут быть использованы традиционные методы построения расписаний [7–9] и методы имитационного моделирования [11, 12].

6. Планирование и построение расписаний работ по изготовлению изделий в условиях постоянного и случайного спроса

Рассмотрим принципы и методы построения планов и расписаний работ на предприятиях с конвейерной сборкой изделий, когда объемы выпуска изделий каждого типа определяются имеющимся на них спросом.

Пусть на предприятии имеется возможность хранения готовой продукции, а производительность имеющегося оборудования достаточна для требуемой продукции в нужном количестве.

Для того чтобы спрос на продукцию каждого типа мог удовлетворяться не только во время ее выпуска, но и во время выпуска продукции других типов должно производиться избыточное количество продукции каждого типа. Часть произведенной продукции реализуется в процессе ее производства, а избыточное ее количество отправляется на склад и реализуется во время выпуска продукции других типов.

Рассмотрим случай, когда на предприятии изготавливаются комплектующие, из которых на одном конвейере последовательно может собираться L различных типов изделий. Спрос r_i ($i = 1, \dots, L$) на выпускаемые изделия постоянный.

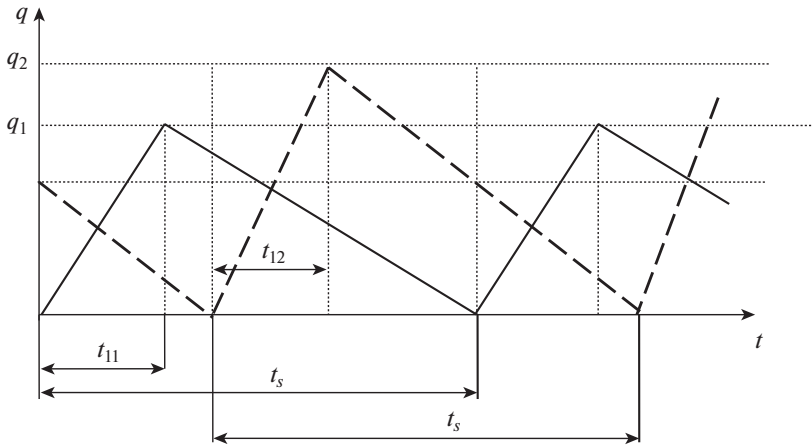


Рис. 4. Графическое представление процессов накопления и расхода производимых деталей двух типов.

Будем считать, что финансовые и временные затраты на подготовку и переналадку конвейера зависят только от типа изделий, которые будут выпускаться после переналадки. Обозначим через \tilde{C}_{si} финансовые, а через τ_i временные затраты на подготовку и переналадку конвейера для сборки i -х изделий ($i = 1, \dots, L$).

В задаче требуется таким образом определить объемы выпуска изделий каждого типа, чтобы на складе не было излишков и дефицита производимой продукции, а количество переналадок конвейера с выпуска одних изделий на другие за время планирования было бы по возможности минимальным.

Для обеспечения последовательного изготовления изделий L типов и наличия их на складе времена между началом смежных выпусков изделий каждого типа предлагается сделать одинаковыми [6].

В этом случае процесс накопления и расхода производимой продукции каждого типа на складе будет периодической функцией с периодом, равным t_s . Для двух типов изделий такой процесс графически можно представить в виде, показанном на рис. 4.

В течение времени t_{11} на конвейере производится сборка изделий первого типа. Часть производимых изделий направляется потребителям, а остальная часть в количестве q_1 накапливается на складе и до возобновления выпуска этих изделий реализуется в соответствии со спросом. После прекращения их выпуска в момент времени t_{11} производится переналадка конвейера на выпуск изделий второго типа, который продолжается в течение времени t_{12} . Часть производимых изделий направляется потребителям, а остальная часть в количестве q_2 накапливается на складе и до возобновления их выпуска реализуется в соответствии со спросом. После прекращения их выпуска производится переналадка конвейера на выпуск изделий первого типа, и весь процесс повторяется.

В соответствии с [6] интервал времени t_s между смежными возобновлениями выпуска изделий одного типа, обеспечивающий отсутствие их дефицита

на складе в условиях постоянного спроса r_l ($l = 1, \dots, L$), определяется с помощью следующего соотношения:

$$t_s = \max \left\{ \sqrt{\frac{2 \sum_{l=1}^L \tilde{C}_{sl}}{\sum_{l=1}^L C_l r_l \left(1 - \frac{r_l}{p_l}\right)}}, \frac{\sum_{l=1}^L \tau_l}{1 - \sum_{l=1}^L \frac{r_l}{p_l}} \right\},$$

где C_l – стоимость хранения l -го изделия в единицу времени, p_l – производительность конвейера по выпуску изделий l -го типа. Остальные обозначения определены выше.

Величины q_l , определяющие запасы изделий l -го типа, которые должны быть накоплены на складе за время их выпуска, вычисляются с помощью соотношений

$$q_l = (p_l - r_l) t_{1l}, \quad l = 1, \dots, L,$$

а величины \tilde{q}_l , определяющие количество изделий l -го типа, которое должно выпускаться за время t_s , определяется следующим образом:

$$\tilde{q}_l = r_l t_s = p_l t_{1l}, \quad l = 1, \dots, L.$$

В условиях случайного спроса в соответствии с [6] интервал времени t_s между смежными возобновлениями выпуска изделий одного типа определяется с помощью соотношения

$$t_s = \max \left\{ \sqrt{\frac{2 \sum_{l=1}^L \tilde{C}_{sl}}{\sum_{l=1}^L C_l r_l \left(1 - \frac{\bar{r}_l}{p_l}\right)}}, \frac{\sum_{l=1}^L \tau_l}{1 - \sum_{l=1}^L \frac{\bar{r}_l}{p_l}} \right\},$$

где \bar{r}_l – величина среднего спроса на изделия l -го типа ($l = 1, \dots, L$) в течение интервала планирования T . Величины \bar{r}_l определяются, как правило, с использованием методов прогнозирования [13].

Величины q_l и \tilde{q}_l определяются с помощью соотношений

$$q_l = (p_l - \bar{r}_l) t_{1l}, \quad \tilde{q}_l = \bar{r}_l t_s = p_l t_{1l}, \quad l = 1, \dots, L.$$

Расчет расписаний работ на таких предприятиях в условиях случайного спроса \bar{r}_l ($l = 1, \dots, L$) после определения величин \tilde{q}_l ($l = 1, \dots, L$) может производиться в соответствии со схемой, которая представлена в предыдущем разделе. В условиях случайного спроса возможен дефицит продукции на складе.

7. Планирование и построение расписаний транспортировки деталей между производственными участками предприятия

Рассмотрим принципы построения планов и расписаний транспортировки деталей, обработанных в одном производственном подразделении, на другое для их последующей обработки.

Эти проблемы оказывают значительное влияние на его работу в целом, поскольку без их решения организовать ритмичную работу предприятия чрезвычайно сложно.

В условиях традиционной обработки комплектующих, когда после завершения их обработки в одном производственном подразделении предприятия для продолжения обработки они должны доставляться в разные подразделения, эффективную транспортировку деталей организовать весьма сложно. Говорить о планировании и построении расписаний их транспортировки к местам дальнейшей обработки в этом случае бесполезно. Это, по-видимому, является одной из важнейших причин того, что в мелкосерийном производстве детали только около 10% времени находятся в обработке, а остальные 90% времени пролеживают на складах производственных подразделений предприятий в ожидании доставки к станкам и в другие подразделения для продолжения обработки или транспортируются [14].

В данной работе, как уже отмечалось выше, обработку деталей предлагается производить группами, в каждую из которых включаются детали, проходящие при своей обработке производственные подразделения предприятия в одном порядке. Организация изготовления комплектующих такими группами позволяет не только строить расписания работ на уровне предприятий, но и организовывать эффективную транспортировку комплектующих между производственными участками в процессе их изготовления.

Действительно в условиях предлагаемой организации работ каждую группу комплектующих после завершения ее обработки в одном подразделении следует доставлять в другое, на котором по технологическому маршруту должны продолжать обрабатываться все комплектующие этой группы. Момент завершения обработки группы комплектующих в подразделении, когда может быть начата их транспортировка, определяется по построенному «каркасному» расписанию их изготовления на предприятии.

Комплектующие на машиностроительных предприятиях обычно хранятся и транспортируются между оборудованием и подразделениями в специальных поддонах или паллетах. Количество комплектующих каждого типа, которое можно разместить на одном поддоне или паллете, известно.

Будем считать, что поддон и паллета занимают одно место на транспортных средствах. Такое предположение не является принципиальным, но позволяет упростить громоздкие расчеты и облегчить изложение принципов построения планов и расписаний транспортировки комплектующих.

К сожалению, в данной статье нет возможностей для рассмотрения вопросов, связанных с распределением транспортных средств по производственным подразделениям предприятия для транспортировки комплектующих между подразделениями в процессе обработки.

Поэтому рассмотрим принципы построения планов и расписаний транспортировки комплектующих, обработанных в ν -м производственном подразделении, для продолжения обработки в j -е подразделение, когда для этого уже выделено \tilde{w}_r транспортных средств r -го типа ($\tilde{w}_r \leq w_r, r = 1, \dots, R$).

Здесь через w_r обозначено количество транспортных средств r -го типа ($r = 1, \dots, R$), которыми располагает предприятие, с грузоподъемностью W_r мест для размещения поддонов и паллет.

Алгоритм построения расписания транспортировки деталей по шагам может быть представлен в следующем виде.

Шаг 1. Величина остатка количества мест Q_{msl}^0 , требуемых для размещения комплектующих из m_{sl} -й группы на транспортных средствах, полагается равной M_{msl} , множество ожидающих погрузки транспортных средств J_w^0 включает все выделенные для перевозки транспортные средства \tilde{w}_r ($r = 1, \dots, R$), а время их прибытия полагается равным t_0 . Индекс k полагается равным нулю. Переход к шагу 2.

Шаг 2. Производится проверка количества мест Q_{msl}^k , которые занимают комплектующие m_{sl} -й группы на складе ν -го подразделения. Если эта величина оказалась нулевой, то вычисления прекращаются, и следует переход к шагу 7. В противном случае переход к шагу 3.

Шаг 3. Производится проверка множества ожидающих погрузки транспортных средств J_w^k . Если это множество оказалось пустым, то ожидается возвращение первого из освободившихся транспортных средств после его разгрузки на складе j -го подразделения, и время начала погрузки будет равно времени его возвращения. Если множество J_w^k оказалось не пустым, то выбирается одно из транспортных средств, ожидающих погрузку, и определяется время начала его погрузки. Время начала погрузки каждого транспортного средства равно времени его прибытия, если на складе производственного участка одно из мест погрузки свободно, и равно времени его прибытия плюс наименьшее время до освобождения одного из мест погрузки склада. Переход к шагу 4.

Шаг 4. Определяется время завершения погрузки комплектующих на загружаемое транспортное средство и время его отправки. Это время будет равно времени начала погрузки транспортного средства плюс длительности его погрузки. Величина индекса k увеличивается на 1 после отправки каждого транспортного средства. Переход к шагу 5.

Шаг 5. Определяется величина остатка Q_{msl}^{k+1} после произведенной отгрузки. Из множества ожидающих в очереди на погрузку транспортных средств J_w^{k+1} исключается загруженное и отправленное транспортное средство. Переход к шагу 6.

Шаг 6. Определяется время прибытия t_k к складу j -го подразделения транспортного средства, загруженного на складе ν -го подразделения плюс время движения до j -го подразделения. Определяется также время завершения его разгрузки \tilde{t}_k , равное времени прибытия t_k плюс время его разгрузки, и время возвращения к складу ν -го подразделения, равное времени завершения его разгрузки \tilde{t}_k плюс время движения до ν -го подразделения. Переход к шагу 2.

Шаг 7. Производится завершение вычислений по формированию расписания транспортировки комплектующих.

Построение расписаний транспортировки позволит обоснованно определять время завершения доставки комплектующих для продолжения обработки, а также определять необходимое количество транспортных средств, чтобы завершить доставку комплектующих к требуемому времени.

8. Результаты вычислительных экспериментов

С использованием предложенных в работе методов было решено более десятка тестовых задач по построению расписаний работ на предприятиях, в которых сборка выпускаемых изделий производится на конвейерах. Все вычислительные эксперименты производились на компьютере с 6 Гб оперативной памяти, работающем на двухъядерном процессоре Intel(R) Core (TM) i5-4200, имеющем тактовую частоту 1,6 ГГц.

Результаты остальных расчетов приведены в таблице.

Таблица

Типов изделий	Типов деталей	Операций	Станков	Конвейеров	Время расчета
20	21183	97959	30	1	30 мин 52 с
25	50999	293019	42	1	47 мин 36 с
35	95367	512975	45	2	1 ч 15 мин
70	296387	967251	50	2	2 ч 45 мин
120	301372	1503985	100	3	3 ч 36 мин

Проведенные вычислительные эксперименты показали достаточно высокую эффективность предложенных методов.

9. Заключение

Идеи агрегирования информации, предложенные для построения расписаний работ в [1], оказались весьма продуктивными.

С помощью этих идей удалось предложить другую организацию изготовления комплектующих, когда их обработка производится группами, которые формируются по описанным выше принципам. Это позволяет:

- разработать методы построения расписаний обработки комплектующих на уровне предприятий;
- организовать эффективную доставку деталей между производственными подразделениями;
- более эффективно управлять межцеховыми транспортными средствами предприятия;
- детализировать «каркасные» расписания на уровне предприятий до расписаний обработки отдельных деталей на всем используемом оборудовании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Хоботов Е.Н.* О некоторых моделях и методах решения задач планирования в дискретных производственных системах // *АиТ.* 2007. № 12. С. 85–100.
Khobotov E.N. On Some Models and Methods of the Solution of Scheduling Problems in Discrete Enterprises // *Autom. Remote Control.* 2007. P. 2172–2186.
2. *Сидоренко А.М., Хоботов Е.Н.* Планирование производств с параллельной сборкой изделий // *Вест. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение».* 2009. № 3. С. 100–109.
3. *Куняев М.С., Фирсов А.С., Хоботов Е.Н.* Об одном подходе к построению системы планирования работ на машиностроительном предприятии // *Вест. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение».* 2009. № 4. С. 91–102.
4. *Сидоренко А.М., Хоботов Е.Н.* Агрегирование при планировании работ на машиностроительных предприятиях // *Теория и системы управления.* 2013. № 5. С. 132–144.
5. *Ларина Е.А., Сидоренко А.М., Хоботов Е.Н.* Выбор порядка сборки узлов и агрегатов при планировании работ на предприятиях с дискретным характером производства // *Проблемы управления.* 2013. № 3. С. 71–77.
6. *Хоботов Е.Н.* Задачи и методы управления многономенклатурными запасами в условиях производства продукции // *Изв. РАН ТиСУ.* 2011. № 6. С. 221–232.
7. *Bruker P.* Scheduling Algorithms. placeCityLeipzig: Springer, 2007. 371 p.
8. *Jain A.S., Meeran S.* Theory and Methodology. Deterministic job-shop scheduling: Past, present and future // *Eur. J. Oper. Res.* 1999. № 112. P. 390–434.
9. *Зак Ю.А.* Прикладные задачи теории расписаний и маршрутизации перевозок. М.: Книжн. дом «Либроком», 2011.
10. *Хоботов Е.Н.* Некоторые замечания к теореме Джонсона // *АиТ.* 1995. № 10. С. 186–187.
Khobotov E.N. Some Comments on Johnson Theorem // *Autom. Remote Control.* 1995. P. 1506–1507.
11. *Калашиников В.В.* Организация моделирования сложных систем М.: Знание, 1982.
12. *Цвиркун А.Д., Акинфиев В.К., Филиппов В.А.* Имитационное моделирование в задачах синтеза структуры сложных систем. М.: Наука, 1985.
13. *Бокс Дж., Дженкинс Т.* Анализ временных рядов. Прогноз и управление. М.: Мир, 1974.
14. *Базров Б.М.* Основы технологии машиностроения. М.: Машиностроение, 2005.

Статья представлена к публикации членом редколлегии А.А. Лазаревым.

Поступила в редакцию 29.03.2018

После доработки 10.10.2018

Принята к публикации 08.11.2018