

© 2023 г. Е.Н. ХОБОТОВ, д-р техн. наук (e_khobotov@mail.ru)
(Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва)

ЗАДАЧИ И МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ РАСПИСАНИЙ РАБОТ ДЛЯ ПРЕДПРИЯТИЙ СО СТАПЕЛЬНОЙ СБОРКОЙ ВЫПУСКАЕМЫХ ИЗДЕЛИЙ

Рассматриваются задачи построения расписаний работ для предприятий со стапельной сборкой изделий. В состав таких предприятий может входить несколько производственных подразделений, в которых изготавливаются комплектующие, предназначенные для сборки из них на стапелях выпускаемых изделий. Для решения рассматриваемых задач предлагаются методы, позволяющие строить согласованные расписания работ для всех производственных подразделений предприятия.

Ключевые слова: теория расписаний, стапели, стапельная сборка изделий, методы агрегирования, «каркасные» расписания, методы построения расписаний, производственные подразделения.

DOI: 10.31857/S0005231023120073, EDN: NGKFUJ

1. Введение

Повышению эффективности предприятий машиностроения в последние годы во многих странах начали уделять повышенное внимание. Для предприятий с дискретным характером производства, к которым относятся машиностроительные предприятия, повышению эффективности в значительной степени способствуют методы теории расписаний [1–3].

Такие методы были разработаны для построения расписаний в производственных системах, участках и подразделениях предприятий, и их использование позволило заметно сокращать время изготовления поступающих заказов.

К сожалению, для построения расписаний работ на предприятиях со стапельной сборкой выпускаемых изделий разработанные методы [1–3] оказались непригодными из-за большой размерности возникающих задач. В [4] для решения этой проблемы был предложен подход, основанный на использовании методов агрегирования информации. В [5] на основе этого подхода были предложены алгоритмы построения расписаний работ на предприятиях с конвейерной сборкой выпускаемых изделий.

Однако специальных методов для построения расписаний работ на предприятиях со стапельной сборкой выпускаемых изделий разработано не было, хотя в промышленности многих стран предприятий указанного типа имеется достаточно много. К ним относятся, например, станкостроительные, судостроительные, многие авиастроительные и машиностроительные предприятия.

В данной работе предлагаются методы построения расписаний работ на предприятиях со стапельной сборкой выпускаемых изделий. Для построения этих методов был использован предложенный в [4] подход, основанный на использовании принципов агрегирования информации. Кроме того, в работе приводятся результаты вычислительных экспериментов, полученных при использовании разработанных методов для построения расписания обработки комплектующих на тестовом примере предприятия со стапельной сборкой.

2. Постановка задачи построения расписаний

Постановка задачи построения расписаний работ на предприятии со стапельной сборкой выпускаемых изделий, для решения которой предназначены предлагаемые методы, может быть сформулирована следующим образом.

Пусть на предприятии с дискретным характером производства имеется M ступеней различных типов и R производственных подразделений. На этих ступенях из комплектующих, которые изготавливаются в производственных подразделениях предприятия, производится сборка изделий L типов.

Количество и типы комплектующих, которые входят в состав любого производимого на предприятии изделия, известны. Часть комплектующих, используемых для сборки производимых изделий, изготавливается на предприятии, а часть может закупаться на стороне. Для каждой комплектующей любого изделия, производимой на предприятии, известны последовательность и времена ее обработки на всем используемом оборудовании предприятия, а также времена переналадки этого оборудования для ее обработки. Нормативы времени и последовательность установки каждой комплектующей в собираемое изделие также известны.

Изделия на ступенях собираются обычно в соответствии со следующей схемой. Сначала перед сборкой каждого изделия в производственных подразделениях предприятия изготавливается часть комплектующих, которая обычно устанавливается в собираемое изделие в соответствии с технологией сборки в первую очередь. Порядок установки каждой комплектующей в соответствующее собираемое изделие задан. Пока изготовленные комплектующие устанавливаются в собираемое изделие, в производственных подразделениях предприятия изготавливаются те комплектующие, которые должны устанавливаться в собираемое изделие в следующую очередь и т.д. Такой процесс продолжается до тех пор, пока сборка изделия не будет завершена. При одновременной сборке различных изделий на ступенях комплектующие для них изготавливаются совместно в одних и тех же производственных подразделениях предприятия.

В задаче требуется построить расписания работ на предприятии таким образом, чтобы поступивший заказ, который состоит из заданного количества N_l ($l = 1, \dots, L$) изделий, производимых на предприятии, был выполнен за меньшее время. Сборку каждого изделия желательно производить по воз-

возможности без перерывов на ожидание доставки недостающих комплектующих.

Требование, связанное с проведением сборки изделий без перерывов на ожидание комплектующих, обусловлено тем, что качество производимой продукции, как отмечалось на 2-й Международной конференции по гибким производственным системам, г. Магдебург, 1985 г., в значительной степени зависит от ритмичности производства.

3. Принципы построения расписаний работ в условиях одного стапеля

Принципы построения расписаний работ удобно сначала рассмотреть на примере сборки на одном стапеле изделий L разных типов, имеющих в своем составе \tilde{M}_l ($l = 1, \dots, L$) типов комплектующих.

Известны состав оборудования в каждом подразделении предприятия, последовательность и время обработки каждой комплектующей для собираемых изделий на всем используемом оборудовании, а также последовательность и время \hat{t}_{il} установки каждой комплектующей i ($i = 1, \dots, \tilde{M}_l$) в собираемое изделие l ($l = 1, \dots, L$). Для сокращения времени обработки комплектующих целесообразно предварительно строить расписания работ и в соответствии с ним производить обработку комплектующих. Это во многих случаях [1–5] позволяет заметно сокращать время выполнения поступивших заказов.

Комплектующие, которые будут совместно обрабатываться в производственных подразделениях предприятия и затем устанавливаться в собираемые изделия, назовем набором комплектующих. Каждый из таких наборов должен включать только те комплектующие, которые в соответствии с порядком сборки могут быть установлены в изделие и позволят установить остальные комплектующие набора. В наборе не должны отсутствовать комплектующие, без которых невозможна установка каких-либо других комплектующих набора.

Комплектующие из каждого набора перед установкой в собираемое изделие хранятся в межоперационных складах, которые используются для этих целей при стапельной сборке. Вместимость таких складов обычно ограничена. Поэтому количество комплектующих, которое может быть включено в любой набор, должно быть тоже ограничено. Минимальное количество наборов комплектующих K_l , которое может быть использовано для изготовления l -го изделия, определяется с помощью соотношения

$$(3.1) \quad K_l = \left[\frac{\tilde{M}_l}{v} \right] + 1,$$

где $[a]$ – целая часть числа a , v – максимальное количество комплектующих, которые могут храниться на межоперационном складе при стапеле.

Пусть для сборки l -го изделия сформировано согласно (3.1) k_l ($k_l \geq K_l$) наборов комплектующих, каждый из которых включает n_{il} ($i = 1, \dots, k_l$) комплектующих в порядке их установки в изделие и может быть размещен на межоперационном складе при стапеле, т.е. все $n_{il} \leq v$.

Время завершения обработки комплектующих, устанавливаемых в первую очередь в соответствии с построенным расписанием в l -е изделие, пусть будет равно \tilde{t}_{1l} . Тогда время начала сборки l -го изделия T_{1l} должно быть больше этого времени и удовлетворять условию: $T_{1l} \geq \tilde{t}_{1l}$. Во время установки на стапеле в собираемое изделие изготовленных комплектующих в производственных подразделениях предприятия обрабатываются комплектующие для установки в изделие в следующую очередь.

Установка комплектующих из второго набора в собираемое изделие может начаться только тогда, когда завершится установка всех ранее обработанных комплектующих из первого набора в это изделие и будет завершена обработка комплектующих второго набора. Если установка комплектующих из первого набора завершится позже или одновременно с завершением обработки комплектующих из второго набора, то установка комплектующих из второго набора в собираемое изделие может производиться без вынужденных простоев на ожидание доставки необходимых комплектующих.

В противном случае установка комплектующих из второго набора в l -е изделие может начаться только после завершения их обработки и доставки на сборку, т.е. с вынужденным простоем для ожидания их доставки. Для того чтобы не было вынужденных простоев в процессе сборки изделия, сборку можно начинать позже.

Время T_{2l} , когда можно начать сборку изделия после начала обработки комплектующих, чтобы не ожидать поступления комплектующих из второго набора для установки их в собираемое изделие, можно определить с помощью следующего соотношения:

$$(3.2) \quad T_{2l} = T_{1l} + \max \{ \tilde{t}_{2l} - \tilde{t}_{1l} - \hat{t}_{1l}, 0 \}, \quad T_{1l} = \tilde{t}_{1l},$$

где \tilde{t}_{2l} – время завершения обработки комплектующих из второго набора для l -го изделия, \hat{t}_{1l} – время установки комплектующих из первого набора в l -е изделие.

Из соотношения (3.2) видно, что правильно рассчитанная задержка начала сборки позволяет обеспечить в данном случае установку второго набора комплектующих без перерывов на ожидание завершения их обработки. Время с начала обработки комплектующих l -го изделия T_{il} , которое определяет начало сборки этого изделия после установки в него комплектующих из i -го набора, чтобы не было вынужденных простоев, можно определить из соотношения

$$(3.3) \quad T_{il} = T_{i-1l} + \max \{ \tilde{t}_{il} - \tilde{t}_{i-1l} - \hat{t}_{i-1l}, 0 \}, \quad i = 2, \dots, k_l,$$

где \tilde{t}_{il} – время, прошедшее с начала обработки комплектующих и до завершения обработки комплектующих из i -го набора, \hat{t}_{i-1l} – время установки ком-

плектующих из $(i-1)$ -го набора в l -е изделие, \tilde{t}_{kl} – время, прошедшее с начала обработки комплектующих и до завершения обработки комплектующих последнего k_l -го набора, в который входит последняя M_l -я комплектующая l -го изделия.

Время T_{kl} определяет момент, когда можно начать сборку l -го изделия после начала изготовления комплектующих для него, чтобы в процессе сборки не было вынужденных простоев из-за ожидания комплектующих.

Времена \tilde{t}_{il} ($i = 1, \dots, k_l$) в (3.3) могут быть определены в результате построения расписания обработки комплектующих из соответствующего набора. Методы построения таких расписаний будут рассмотрены в следующем разделе

Время последовательной установки комплектующих i -го набора в l -е изделие можно определить с использованием соотношения

$$\hat{t}_{il} = \sum_{j \in J_{il}} \tau_{jil},$$

где τ_{jil} – время установки j -й комплектующей i -го набора в l -е изделие, J_{il} – множество комплектующих i -го набора l -го изделия, содержащее n_{il} элементов.

После обработки комплектующих i -го набора при $i < k_l$ начинаются обработка комплектующих $(i + 1)$ -го набора и установка комплектующих i -го набора в собираемое изделие. Когда завершится обработка комплектующих k_l -го набора, то начинается их установка в изделие, завершающая сборку l -го изделия. После этого может начаться обработка комплектующих для сборки следующего изделия.

Если на стапеле изготавливаются последовательно L типов изделий и имеется возможность выбирать последовательность их изготовления, то можно выбрать такой порядок их сборки, при котором длительность их сборки будет меньшей. Процесс изготовления изделий на стапеле, который выполняется в соответствии с описанной выше схемой, можно представить с использованием «каркасного» расписания [6] в виде, показанном на рис. 1.

В соответствии с этой схемой сначала изготавливается определенная часть комплектующих, которые в первую очередь устанавливаются в собираемое изделие. Затем одновременно с этой установкой производится обработка сле-

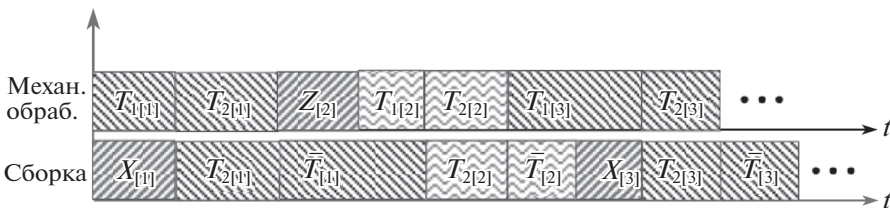


Рис. 1. Диаграмма Гантта «каркасного» расписания изготовления на стапеле изделий.

дующего набора и т.д., до изготовления комплектующих k_l -го набора. Во время их установки в l -е изделие, что завершает сборку l -го изделия, может начаться обработка комплектующих для другого изделия.

На рис. 1 через $T_{1[l]}$ обозначен «каркас» времени [6] обработки комплектующих перед установкой их в изделие, которое будет собираться l -м по порядку, через $X_{[l]}$ – «каркас» времени, которое выделяется для изготовления или завершения изготовления первого набора комплектующих перед их установкой в изделие, собираемое l -м по порядку, через $T_{2[l]}$ – время, в течение которого изготавливаются комплектующие для собираемого l -м по порядку сборки изделия и одновременно производится установка уже изготовленных комплектующих в это изделие, через $\bar{T}_{[l]}$ – время, в течение которого в l -е по порядку сборки изделие устанавливаются уже изготовленные последние комплектующие, через $Z_{[l]}$ – время задержки начала обработки комплектующих для изделия, собираемого l -м по порядку.

Для определения последовательности, в которой целесообразно производить сборку L изделий на одном стапеле, если порядок их сборки может быть выбран, предлагается использовать теорему [6], которая для этого случая имеет вид.

Теорема. Пусть требуется изготовить L типов изделий, сборка каждого из которых производится по описанной выше схеме, а времена $T_{1[l]}$, $\bar{T}_{[l]}$ и $T_{2[l]}$ для каждого изделия известны. Тогда, при одновременной доступности всех работ и оборудования, последовательность изготовления изделий, при которой длительность «каркасного» расписания изготовления всех изделий будет минимальной, когда сумма

$$\sum_{l=1}^{L-1} \max \{T_{1[l+1]} - \bar{T}_{[l]}, 0\} + T_{1[1]}$$

достигает максимального значения.

4. Принципы построения расписаний работ в случае нескольких стапелей

Рассмотрим теперь задачу, в которой требуется построить расписание работ по изготовлению N_l ($l = 1, \dots, L$) изделий на предприятии, имеющем M стапелей для сборки выпускаемых изделий.

Комплектующие одновременно собираемых изделий предлагается, как и в случае одного стапеля, объединять в совместно обрабатываемые на предприятии наборы комплектующих и строить для их обработки расписания работ.

Будем считать, что на предприятии для каждого стапеля определен порядок сборки изделий из этого задания. Если порядок сборки изделий на стапелях может быть выбран, то возникает достаточно сложная задача формирования групп одновременно собираемых изделий и определения наиболее выгодного порядка сборки изделий на каждом стапеле.

К сожалению, пока не разработано эффективных алгоритмов формирования таких групп, но определен ряд рекомендаций, позволяющих при их формировании исключать не совсем подходящие варианты.

При формировании групп одновременно собираемых изделий целесообразно рассматривать для включения в каждую группу изделия, имеющие приблизительно одинаковое количество комплектующих и время сборки из них изделий без учета вынужденных простоев.

Нецелесообразно включать в группу одновременно собираемых изделие, значительная часть комплектующих которого обрабатывается на оборудовании, наиболее загруженном комплектующими уже включенными в эту группу изделий.

Для включения в группу одновременно собираемых могут рассматриваться изделия, обработка комплектующих которых не приведет к значительной разнице в загрузке оборудования предприятия. При этом желательно, чтобы рассматриваемые изделия имели бы количество комплектующих и времена установки в изделия приблизительно такие же, как и у включенных уже в эту группу изделий.

После формирования групп одновременно собираемых изделий целесообразно строить расписания обработки их комплектующих. Это позволит наглядно и достаточно точно оценить, являются ли подходящими сформированные группы одновременно собираемых изделий, и в случае необходимости произвести корректировку их формирования.

Комплектующие, которые целесообразно включать в указанные наборы, должны быть после обработки установлены в собираемые изделия в соответствии с порядком, заданным технологией сборки, до установки комплектующих из следующего набора.

После завершения установки последней комплектующей в собираемое изделие и проведения контрольных операций соответствующий станочный стол освобождается от собранного изделия и на нем может начаться сборка следующего изделия. Поэтому часто могут возникать ситуации, когда для изделий, собираемых на одних станочных столах, продолжается сборка изделий, а на других станочных столах сборка изделий будет только начинаться.

Принципы построения расписаний работ по изготовлению комплектующих в условиях станочной сборки будут рассмотрены в следующем разделе.

Пусть изготовление поступившего заказа производится по описанной выше схеме. Тогда будем считать, что начало установки комплектующих в собираемые изделия T_1 должно удовлетворять условию: $T_1 \geq \hat{t}_1$, где \hat{t}_1 – время завершения работ по изготовлению первого набора комплектующих с момента начала изготовления комплектующих.

Установка комплектующих из следующего набора в собираемые изделия начинается, когда завершится обработка всех комплектующих из этого набора и будет окончена установка всех комплектующих из предыдущего набора.

Если установка комплектующих из предыдущего набора завершится позже, чем будет завершена обработка комплектующих из следующего набора,

то установка комплектующих из следующего набора в собираемые изделия может производиться без вынужденных простоев на ожидание необходимых комплектующих.

В противном случае установка комплектующих из следующего набора в собираемые изделия может начаться только после завершения их обработки и доставки на сборку, т.е. с вынужденным простоем для ожидания доставки комплектующих.

Для устранения возможности появления вынужденных простоев придется задерживать начало сборки некоторых изделий без изменения времени начала обработки комплектующих для множества одновременно собираемых изделий.

Время T_{jl} , когда можно начать сборку l -го изделия, чтобы из-за задержек при обработке комплектующих j -го набора не возникло вынужденных простоев во время сборки l -го изделия, можно определить из соотношения:

$$(4.1) \quad T_{jl} = T_{(j-1)l} + \max \{ \tilde{t}_j - \tilde{t}_{j-1} - \hat{t}_{(j-1)l}, 0 \}, \quad j = 2, \dots, k_l, \quad T_{1l} = \tilde{t}_1,$$

где \tilde{t}_j – время, прошедшее с начала обработки комплектующих до завершения обработки j -го набора комплектующих, $\hat{t}_{(j-1)l}$ – время установки комплектующих из $(j-1)$ -го набора в l -е изделие, T_{kl} – время, когда следует начать сборку l -го изделия, чтобы из-за установки в него комплектующих и в том числе последнего для этого изделия k_l -го набора не возникло вынужденных простоев.

Таким образом, в результате построения расписания работ, связанных с изготовлением l -го изделия, согласно (4.1) вычисляется время T_{kl} с начала изготовления комплектующих, когда следует начать сборку l -го изделия, чтобы в ее процессе не возникало вынужденных простоев из-за ожидания комплектующих. Определяются моменты \tilde{t}_{il} ($i = 1, \dots, k_l$) начала и завершения обработки комплектующих i -го набора ($i = 1, \dots, k_l$). После обработки комплектующих i -го набора при $i < k_l$ начинаются обработка комплектующих $(i + 1)$ -го набора и установка комплектующих i -го набора в собираемое изделие. После изготовления комплектующих k_l -го набора производится их установка в l -е изделие, завершающая его сборку.

Если возникновение вынужденных простоев допускается, то ни вычисления величин T_{kl} , ни задержек в сборке изделий не потребуется.

5. Построение расписаний работ на предприятиях со ступенчатой сборкой

Рассмотрим принципы создания методов, которые позволят строить расписания работ по обработке комплектующих на предприятиях со ступенчатой сборкой выпускаемых изделий.

Как уже отмечалось выше, планы и расписания работ для повышения эффективности предприятий следует строить для всех подразделений предприятия таким образом, чтобы они были согласованными между собой.

Под согласованными планами и расписаниями работ здесь понимаются такие планы и расписания работ, когда с их помощью можно определить время начала и завершения обработки каждой детали на всем используемом для ее обработки оборудовании. Такие планы и расписания работ в [4] были названы планами и расписаниями работ на уровне предприятий. Для их построения в [4] был предложен подход, основанный на использовании методов агрегирования информации.

Необходимость использования этого подхода была вызвана непригодностью имевшихся методов [1–3] построения расписаний работ для формирования таких планов и расписаний. Действительно, эти методы были разработаны для построения расписаний работ в производственных подразделениях предприятия.

С их помощью можно попытаться построить расписания работ на предприятии двумя способами.

При использовании первого способа предприятие рассматривается, как большое подразделение, для которого строится расписание работ. Однако в этом случае может оказаться, что количество оборудования в таком подразделении достаточно большое и требуется обработать очень большое количество деталей на многих типах оборудования. Задача построения такого расписания может иметь очень большую размерность и для ее решения с помощью таких методов потребуется большое время, которое в некоторых случаях, как показали расчеты, может в несколько раз превышать время реальной обработки этих комплектующих на предприятии.

При использовании второго способа можно попытаться строить расписания работ для отдельных подразделений и потом на их основе формировать общее расписание работ на предприятии.

При таком способе для каждого подразделения необходимо выбрать времена начала построения расписания обработки групп комплектующих в этом подразделении. Кроме того, в каждую группу надо включить комплектующие, обработку которых можно начать в эти моменты времени. Под такими комплектующими здесь понимаются комплектующие, которые к началу построения расписания в этом подразделении были обработаны на всем оборудовании по технологии их изготовления до обработки в данном подразделении.

Однако в этом случае совсем непонятно, как выбирать времена для начала построения таких расписаний в каждом подразделении, как подбирать комплектующие в группы, расписания обработки которых можно начинать строить в эти времена без уже построенных расписаний обработки.

В методах, предлагаемых в работе, эти проблемы решаются в результате построения «каркасных» расписаний, которые формируются на основе идеи агрегирования информации [4] и будут описаны далее.

Идея агрегирования информации при построении расписаний на уровне предприятия состоит в формировании из комплектующих, подлежащих изготовлению, специальных групп. Каждая комплектующая такой группы до-

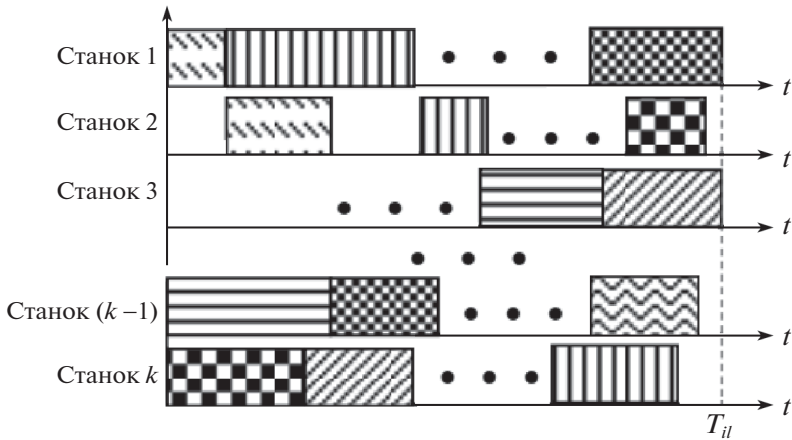


Рис. 2. Диаграмма Ганта, представляющая пример расписания обработки i -й группы деталей в l -м производственном подразделении.

ставляется в процессе своей обработки к одним производственным подразделениям предприятия, в которых эти комплектующие обрабатываются, в одном порядке. При этом любая комплектующая 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 «обобщенном подразделении».

Для каждой «обобщенной детали» известен маршрут поступления на обработку к соответствующим «обобщенным станкам», т.е. известен маршрут поступления каждой сформированной группы на обработку в соответствующие подразделения предприятия. Это справедливо, поскольку в группу включались только те комплектующие, которые поступали на обработку в подразделения предприятия в одной последовательности и эта последовательность известна.

При построении расписания обработки таких групп комплектующих требуется минимизировать общее время их изготовления.

Для построения такого расписания должно быть определено время обработки каждой «обобщенной детали» на всех используемых «обобщенных станках», т.е. время обработки каждой группы деталей в тех производственных подразделениях предприятия, где эта группа обрабатывается. Времена обработки могут определяться как с использованием традиционных методов построения расписаний [1–3], так и оценочных моделей [4].

Пример определения времени обработки i -й группы деталей в l -м производственном подразделении T_{il} с использованием расписания ее обработки в этом подразделении приведен на рис. 2.

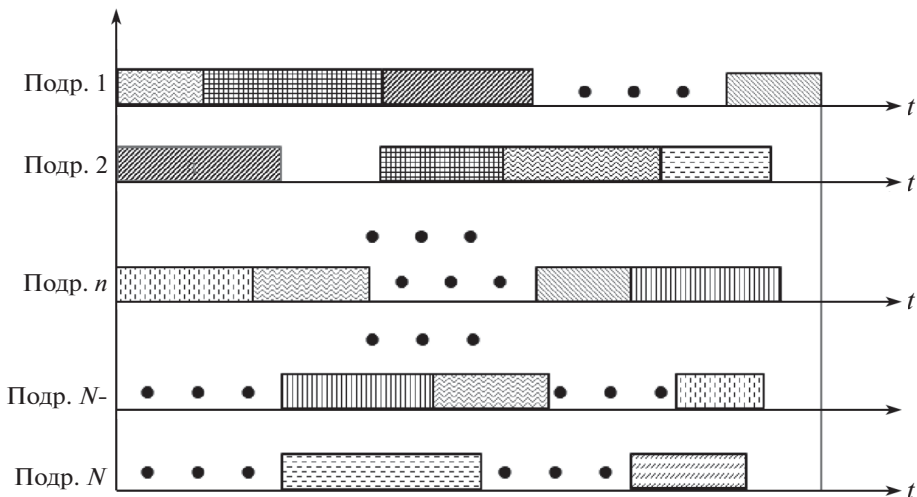


Рис. 3. Диаграмма Гантта, представляющая пример «каркасного» расписания.

После определения величин T_{ij} для всех сформированных групп комплектующих деталей и подразделений предприятия, в которых эти группы обрабатываются, фактически возникает традиционная задача теории расписаний, связанная с построением расписания обработки «обобщенных деталей» в производственном подразделении, состоящем из «обобщенных станков». В [4] подобное расписание изготовления групп деталей в подразделениях предприятия названо «каркасным». Пример такого расписания приведен на рис. 3.

«Каркасное» расписание, как видно из рис. 3, имеет практически такой же вид, как и расписание обработки деталей в производственном подразделении, представленное на рис. 2. Однако в диаграмме Гантта, представляющей «каркасное» расписание, вместо станков по оси ординат откладываются производственные подразделения предприятия (производственные системы и участки, цеха), а вместо времени обработки деталей по каждой из осей абсцисс откладываются времена обработки групп деталей в соответствующих подразделениях. Для построения «каркасных» расписаний могут использоваться традиционные методы построения расписаний [1–3], поскольку размерность задач при агрегировании значительно снижается.

В «каркасном» расписании в отличие от расписания обработки деталей в подразделении строится обработка групп деталей в подразделениях предприятий. В связи с этим часто оказывается, что в некоторые моменты времени для части деталей группы обработка оказывается завершенной. Такие детали могут быть переданы в следующее подразделение предприятия по маршруту обработки этой группы. Подобная возможность оказывается чрезвычайно полезной, особенно в те моменты, когда в следующем подразделении заканчивается обработка деталей и может возникнуть простой из-за задержки деталей, обработка которых еще не завершена. Такая ситуация возникает, например, в подразделениях 1 и 2 (рис. 3). При обработке деталей в подраз-

делениях это невозможно, поскольку часть детали, даже полностью обработанную, передавать куда-либо нельзя.

В [5], как уже отмечалось, на основе описанных выше идей и принципов были разработаны методы построения расписаний работ для предприятий, имеющих в своем составе несколько производственных подразделений и конвейеры, которые использовались для сборки выпускаемых изделий.

С помощью методов, построенных на основе агрегирования информации, удалось достаточно быстро строить расписания работ на предприятиях, имеющих в своем составе более пяти производственных подразделений, в каждом из которых было более двух десятков единиц обрабатывающего оборудования. На предприятии обрабатывалось несколько сот тысяч типов деталей. Построенное «каркасное» расписание было «детализировано» [4–6] до обработки отдельных комплектующих на всем используемом для этого оборудовании.

Здесь, однако, следует отметить, что построение планов и расписаний работ для предприятий со ступенчатой сборкой выпускаемых изделий оказалось значительно более сложной задачей, чем построение расписаний работ для предприятий с конвейерной сборкой выпускаемых изделий.

Это связано с тем, что все группы деталей, сформированные для построения «каркасных» расписаний на предприятиях с конвейерной сборкой изделий, при изменении производственного задания по изготовлению освоенных изделий сохраняют типы включенных в них комплектующих. Меняются только размеры партий этих деталей в соответствующих группах, каждая из которых сохраняет типы включенных в нее комплектующих. Типы включенных в сформированные группы комплектующих могут меняться только в тех случаях, когда изменяется конструкция собираемых изделий, технология изготовления комплектующих изделия или производятся изменения в оборудовании производственных подразделений предприятия. В производственных подразделениях предприятия во время сборки партии каких-либо изделий на конвейере изготавливаются, как правило, только те комплектующие, из которых будут собираться изделия следующей партии. Поэтому типы комплектующих, включенных в сформированные группы, могут не меняться, если не производится модернизация собираемых изделий или предприятия. Для изделий каждого типа могут независимо формироваться свои группы.

На предприятиях со ступенчатой сборкой одновременно на разных ступенях собираются различные изделия, время сборки которых часто оказывается разным. Заранее определить количество и типы комплектующих, которые следует изготавливать в периодически формируемых наборах комплектующих для сборки одновременно собираемых на ступенях изделий, очень сложно.

Поэтому предлагается комплектующие выпускаемых изделий предварительно разделить на такие группы. В каждую группу могут входить комплектующие различных изделий, но все они по технологии изготовления должны в одном порядке поступать на обработку в производственные подразделения

предприятия. Тогда при построении «каркасных» расписаний формирование таких групп из комплектующих разных изделий не вызовет особых затруднений, больших затрат времени и заметно сократит время построения «каркасных» расписаний обработки комплектующих.

Обработка комплектующих группами, сформированными по описанным выше правилам, позволяет, как и для предприятий с конвейерной сборкой выпускаемых изделий [5], не только строить расписания работ на уровне предприятий, но и организовывать эффективную доставку комплектующих для их обработки на производственные подразделения предприятий.

На основе построенных «каркасных» расписаний [5] могут быть сформированы расписания обработки комплектующих в подразделениях на всем используемом для этого оборудовании.

6. Результаты вычислительных экспериментов

Вычислительные эксперименты проводились на примере построения расписания по изготовлению четырех изделий на предприятии, имеющем в своем составе три производственных подразделения, на которых изготавливались комплектующие для сборки на двух стапелях по два изделия. Для сокращения весьма немалых объемов исходной информации и получения оптимальных расписаний обработки комплектующих в производственных подразделениях было лишь по два станка.

Информация о количестве комплектующих каждого изделия, времени и последовательности обработки каждой комплектующей на всем используемом оборудовании производственных подразделений предприятия приводится в приведенных ниже табл. 1–4. Там же приводятся время и последовательность установки каждой комплектующей в соответствующее изделие.

Информация о времени обработки комплектующих в целях проверки некоторых гипотез была подготовлена таким образом, что обработка комплектую-

Таблица 1

1-й стапель		1-е подразделение		2-е подразделение		3-е подразделение		
Порядок установки деталей	Время установки деталей мин	Порядок обработки	Время обработки I станок мин	Время обработки II станок мин	Время обработки I станок мин	Время обработки II станок мин	Время обработки I станок мин	Время обработки II станок мин
1.1.1.	25	I	25	5				
1.1.2.	30	I	10	20				
1.1.3.	15	I	5	30				
1.1.4.	20	I	20	25				
1.1.5.	25	I, III	15	10			25	10
1.1.6.	20	I, III	10	25			5	20

Таблица 2

1-й стапель			1-е подразделение		2-е подразделение		3-е подразделение	
Порядок установки деталей	Время установки деталей мин	Порядок обработки	Время обработки I станок мин	Время обработки II станок мин	Время обработки I станок мин	Время обработки II станок мин	Время обработки I станок мин	Время обработки II станок мин
1.2.1.	25	II			25	10		
1.2.2.	20	II			15	25		
1.2.3.	25	II, III			30	5	25	10
1.2.4.	20	I, II	35	15	20	25		
1.2.5.	15	II, III			25	10		
1.2.6.	20	II			5	20		
1.2.7.	35	II, III			25	20	5	25

Таблица 3

1-й стапель			1-е подразделение		2-е подразделение		3-е подразделение	
Порядок установки деталей	Время установки деталей мин	Порядок обработки	Время обработки I станок мин	Время обработки II станок мин	Время обработки I станок мин	Время обработки II станок мин	Время обработки I станок мин	Время обработки II станок мин
2.1.1.	25	II			35	10		
2.1.2.	20	II			20	25		
2.1.3.	25	II			5	20		
2.1.4.	30	II, III			20	25	20	25
2.1.5.	15	II			15	20		
2.1.6.	20	II, III			5	25	10	20

щих для первого (1.1.1.–1.1.6.) и второго (2.2.1.–2.2.7.) изделий, собираемых соответственно на первом и втором стапелях, производилась в основном на оборудовании первого подразделения, а обработка комплектующих для второго (1.2.1.–1.2.7.) и первого (2.1.1.–2.1.6.) – в основном на оборудовании второго подразделения.

Для этой задачи было построено три расписания работ по изготовлению комплектующих и сборки из них на двух стапелях по два изделия.

В первом расписании все комплектующие обрабатывались в подразделениях в порядке их установки в соответствующие изделия, который указан в исходных данных. Расписания их обработки не строились. При возникновении конфликтных ситуаций, связанных с назначением комплектующих на обработку, преимущество отдавалось тем комплектующим, которые устанавливались в изделие, собираемое на первом стапеле. Сборка изделий начиналась после обработки трех комплектующих. Время завершения работ по изготов-

Таблица 4

1-й стапель		1-е подразделение		2-е подразделение		3-е подразделение		
Порядок установки деталей	Время установки деталей мин	Порядок обработки	Время обработки I станок мин	Время обработки II станок мин	Время обработки I станок мин	Время обработки II станок мин	Время обработки I станок мин	Время обработки II станок мин
2.2.1.	20	I	35	10				
2.2.2.	25	I	15	25				
2.2.3.	15	I, III	5	25			20	30
2.2.4.	20	I	45	15				
2.2.5.	15	II, III			10	20	15	10
2.2.6.	20	I	25	35				
2.2.7.	25	I, II, III	25	35	15	20	5	20

лению первого изделия на первом стапеле заняло 240 мин (комплектующие 1.1.1.–1.1.6.), второго изделия на первом стапеле – 450 мин (комплектующие 1.2.1.–1.2.7.), первого изделия на втором стапеле – 285 мин (комплектующие 2.1.1.–2.1.6.), второго изделия на втором стапеле – 460 мин (комплектующие 2.2.1.–2.2.7.).

Во втором расписании все комплектующие обрабатывались наборами комплектующих, которые формировались по описанным в статье правилам, и в соответствии с построенным расписанием работ. Расписание работ строилось с использованием условий оптимальности Джонсона и являлось оптимальным для подразделений, состоящих из двух станков. Сборка изделий производилась с задержкой, которая обеспечивала непрерывный процесс сборки без вынужденных простоев на ожидание комплектующих. Время завершения работ по изготовлению первого изделия на первом стапеле заняло 220 мин (комплектующие 1.1.1.–1.1.6.), второго изделия на первом стапеле – 430 мин (комплектующие 1.2.1.–1.2.7.), первого изделия на втором стапеле – 265 мин (комплектующие 2.1.1.–2.1.6.), второго изделия на втором стапеле – 425 мин (комплектующие 2.2.1.–2.2.7.). Построение расписаний работ по обработке комплектующих позволило сократить время изготовления изделий из задания по сравнению с первым расписанием.

Третье расписание работ строилось для случая, когда на первом стапеле изделия собираются в прежнем порядке, а на втором стапеле – в обратном. Время завершения работ по изготовлению первого изделия на первом стапеле заняло 250 мин (комплектующие 1.1.1.–1.1.6.), второго изделия на втором стапеле – 350 мин (комплектующие 2.2.1.–2.2.7.), второго изделия на первом стапеле – 525 мин (комплектующие 1.2.1.–1.2.7.), первого изделия на втором стапеле – 470 мин (комплектующие 2.1.1.–2.1.6.).

При построении этого расписания, когда порядок изготовления первого и второго изделия на втором стапеле поменялся, оказалось, что комплектую-

щие для одновременно собираемых изделий обрабатываются практически на одном и том же оборудовании. Поэтому из-за увеличения времени изготовления комплектующих заметно увеличилось и время изготовления собираемых изделий.

7. Заключение

Для предприятий со стапельной сборкой выпускаемых изделий использование идей агрегирования информации позволяет:

- разработать методы построения расписаний обработки комплектующих и сборки выпускаемых изделий на уровне предприятий;
- строить расписания обработки комплектующих, заметно сокращающие время изготовления поступающих заказов;
- организовать эффективную доставку комплектующих в процессе их изготовления между производственными подразделениями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Pinedo M.L.* Planning and Scheduling in Manufacturing and Services. Leipzig: Springer, 2014. V. 1.
2. *Bruker P.* Scheduling Algorithms. Leipzig: Springer. 2007. 371 p.
3. *Лазарев А.А.* Теория расписаний. Методы и алгоритмы. М.: ИПУ РАН, 2019.
4. *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. V. 68. No. 12. pp. 2172–2186.
5. *Хоботов Е.Н., Ермолова М.А.* Агрегирование в задачах построения расписаний работ на предприятиях с конвейерной сборкой изделий // *АиТ.* 2019. № 5. С. 118–130.
Khobotov E.N., Ermolova M.A. Aggregation in Job-Shop Scheduling Problems on Facilities with Conveyor Assembly of Finished Products // *Autom. Remote Control.* 2019. V. 80. No. 5. pp. 915–928.
6. *Сидоренко А.М., Хоботов Е.Н.* Агрегирование при планировании работ на машиностроительных предприятиях // *Теория и системы управления.* 2013. № 5. С. 132–144.
Sidorenko A.M., Khobotov E.N. Aggregation in Job Scheduling in Machine Works / *Journal of Computer and Systems Sciences International.* Moscow, Russia: Pleiades Publishing, Ltd., 2013. Vol. 52, No. 5. pp. 800–810.

Статья представлена к публикации членом редколлегии А.И. Михальским.

Поступила в редакцию 01.06.2023

После доработки 21.09.2023

Принята к публикации 30.09.2023