

© 2026 г. Е.Н. ХОБОТОВ, д-р техн. наук (e_khobotov@mail.ru)
(Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН;
Российский технический университет МИРЭА, Москва)

МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ И ОСОБЕННОСТИ РАСПИСАНИЙ РАБОТ ДЛЯ ПРЕДПРИЯТИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Рассматриваются задачи и методы построения расписаний работ на машиностроительных предприятиях с большим количеством оборудования, изготавливающих большое количество комплектующих и изделий различных типов. Такие методы основаны на идее последовательного агрегирования и позволяют строить согласованные расписания работ для всех подразделений предприятия. В построенных расписаниях определяется время начала и завершения обработки каждой партии комплектующих на всем используемом оборудовании предприятия.

Ключевые слова: методы моделирования, расписание работ, обрабатывающее оборудование, комплектующие, сборка изделий, технология изготовления, подразделения предприятий, агрегирование.

DOI: 10.7868/S2413977726040064

1. Введение

Задачи теории расписаний обычно возникают, когда имеется возможность выбирать ту или иную последовательность выполнения работ или заданий [1–3]. Особенно эффективными и заметными оказались результаты их решения в промышленности. Построение расписаний работ для производственных систем и участков предприятий позволило заметно сокращать сроки выполнения заказов без вложения дополнительных средств.

Для построения таких расписаний был разработан ряд достаточно эффективных методов [1–3]. К сожалению, эти методы оказались непригодными для построения расписаний работ на предприятиях, имеющих в своем составе большое количество оборудования и изготавливающих значительное количество продукции. Непригодность таких методов вызвана размерностью расписаний на этих предприятиях, которая оказывается чрезвычайно большой. Однако именно на таких предприятиях может быть получен самый высокий экономический эффект от использования расписаний работы.

Для повышения эффективности предприятий с помощью средств теории расписаний следует планировать их работу, используя расписания, построенные для изготовления продукции на всем оборудовании предприятий. В таких расписаниях, которые в [4, 5] названы согласованными, должна обеспечиваться технология изготовления каждой партии комплектующих на всем

оборудовании предприятия. Кроме того, в них должны отсутствовать невынужденные простои оборудования и по возможности сокращены вынужденные простои оборудования.

Для построения согласованных расписаний на предприятиях в [4] был предложен подход, использующий принципы агрегирования. Такой подход был развит и использован в [5, 6] для формирования расписаний работ на машиностроительных предприятиях со ступенчатой и конвейерной сборкой выпускаемых изделий. Однако в тех случаях, когда требуется строить расписания по обработке большого количества комплектующих на предприятиях, имеющих значительное количество оборудования, возникают проблемы. Методы, предложенные в [4] и развитые в [5, 6], для построения расписаний работ в подобных случаях могут оказаться недостаточно эффективными, а в некоторых из таких случаев и совсем непригодными.

В данной работе предлагаются методы, с помощью которых удастся строить расписания работ на таких машиностроительных предприятиях. В предлагаемых методах для построения расписаний работ используются идеи и принципы последовательного агрегирования.

2. Постановка задачи

Рассмотрим задачу по изготовлению комплектующих в производственных подразделениях предприятий для сборки из них выпускаемых изделий.

Пусть на предприятии имеется M механообрабатывающих подразделений. В этих подразделениях изготавливают комплектующие, из которых собирают выпускаемые изделия L типов. Изделия изготавливаются партиями, размеры которых N_l ($l = 1, \dots, L$) задаются в поступающем заказе.

Для каждого выпускаемого изделия известны количество и типы комплектующих его агрегатов, узлов и деталей. Кроме того, известны время и последовательность изготовления каждой партии комплектующих для выпускаемых изделий любого типа, а также время переналадки этого оборудования для их изготовления. Выпускаемые изделия собираются из изготовленных на предприятиях, а также из закупленных на стороне комплектующих деталей, узлов и агрегатов.

В задаче требуется построить такое расписание работ на предприятии, в котором обработка каждой партии комплектующих может начаться на любом используемом оборудовании только когда завершится обработка этой партии на предыдущем оборудовании по технологическому маршруту ее изготовления. Кроме того, выполнение поступившего заказа по такому расписанию должно завершиться за меньшее по возможности время.

3. Принципы построения расписаний обработки комплектующих на предприятиях

Рассмотрим принципы и особенности построения расписаний по изготовлению комплектующих на машиностроительных предприятиях.

Расписания работ на предприятиях с дискретным характером производства целесообразно строить на всем оборудовании предприятия. Только такие расписания работ позволят обеспечить выполнение технологии изготовления комплектующих на предприятиях и могут сократить время изготовления поступивших заказов.

Существующие методы, как уже отмечалось, оказались непригодными для построения расписаний на предприятиях, поскольку размерность расписания работ даже на небольших предприятиях оказывается слишком большой для этих методов.

В [4] был предложен подход, позволяющий разрабатывать методы, пригодные для построения расписаний на машиностроительных предприятиях. Идея предложенного подхода, в котором использованы принципы агрегирования информации, состоит в формировании специальных групп из комплектующих, подлежащих обработке. Наряду с группами комплектующих формируются также группы оборудования, в которых должны обрабатываться комплектующие из этих групп.

Здесь следует отметить, что формирование групп оборудования не предполагает изменений в административной структуре предприятий и используется только для построения расписания работ. Однако в качестве групп оборудования все же удобно выбирать подразделения предприятий. В каждую группу комплектующих включаются только те комплектующие, которые в соответствии с технологией их изготовления в процессе обработки на предприятии поступают в одни и те же производственные подразделения предприятия в одном порядке.

Тем не менее в подразделениях предприятий комплектующие каждой группы обрабатываются по «своим» технологическим маршрутам. Сформированные таким образом группы комплектующих можно рассматривать как «обобщенные детали», а группы из оборудования предприятия – как «обобщенные станки».

Действительно, группы комплектующих поступают в соответствии с технологией их изготовления в производственные подразделения предприятий для обработки, как и детали в механообработке доставляют к обрабатываемому их оборудованию. Для каждой группы комплектующих, как и для деталей в механообработке, известны последовательность обработки в подразделениях предприятий и могут быть определены времена обработки.

Предприятие с производственными подразделениями при подобном агрегировании можно рассматривать как «обобщенное подразделение», содержащее «обобщенные станки», на которых обрабатываются «обобщенные детали».

Поэтому для определения порядка обработки «обобщенных деталей» на «обобщенных станках» в таком «обобщенном подразделении» может быть построено расписание их обработки.

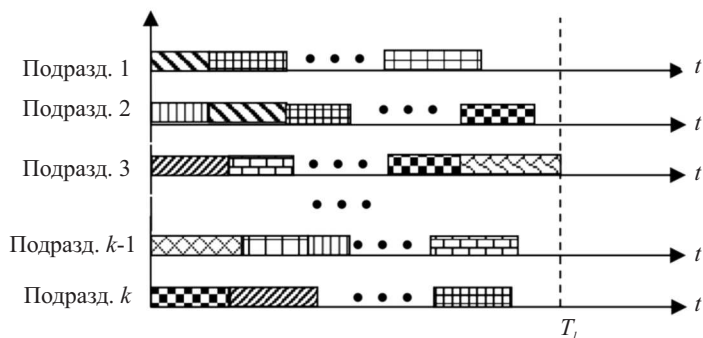


Рис. 1. Диаграмма Гантта «каркасного» расписания обработки групп комплектующих J -го изделия.

Порядок обработки, полученный в этом расписании, должен обеспечить выполнение технологического маршрута обработки «обобщенных деталей» на «обобщенных станках» или групп комплектующих в подразделениях предприятия, а также сокращение времени изготовления этих групп [1–3].

Для построения расписания обработки групп комплектующих в подразделениях предприятий необходимо знать время обработки каждой из этих групп в тех подразделениях, где они обрабатываются. Для определения времени обработки каждой группы в обрабатывающих ее подразделениях строятся расписания ее обработки в этих подразделениях. В качестве времени обработки группы комплектующих в подразделении принимается время завершения обработки последней комплектующей из этой группы на оборудовании подразделения.

Следует также отметить, что эти расписания в дальнейшем будут использоваться для формирования расписания изготовления комплектующих на предприятии. В [4] расписание изготовления групп комплектующих в подразделениях предприятия было названо «каркасным».

Размерность такого расписания оказывается существенно меньше размерности исходного расписания. Это связано с тем, что в «каркасном» расписании вместо нескольких десятков единиц оборудования в каждом подразделении рассматривается только одна единица – «обобщенный станок» или подразделение предприятия. Вместо нескольких десятков единиц комплектующих рассматривается только одна единица – «обобщенная деталь» или группа комплектующих.

Поэтому такое расписание также может быть построено с использованием традиционных методов построения расписаний, если после агрегирования размерность задачи построения «каркасного» расписания окажется не слишком большой для этих методов.

Расписания обработки деталей в производственных системах и участках обычно представляют с помощью диаграмм Гантта [1–3]. «Каркасные» расписания также могут быть представлены с помощью этих диаграмм. На рис. 1 изображена диаграмма Гантта, представляющая пример «каркасного» распи-

сания обработки групп комплектующих для l -го изделия в производственных подразделениях предприятия.

Диаграмма Гантта подобного расписания, как видно из рис. 1, имеет практически такой же вид, как и диаграмма Гантта для расписания обработки деталей в производственном подразделении [1–3]. Только в диаграмме Гантта, представляющей «каркасное» расписание, вместо станков по оси ординат откладываются производственные подразделения предприятия (производственные системы и участки, цеха). Кроме того, в такой диаграмме по каждой из осей абсцисс вместо времени обработки деталей откладываются времена обработки групп деталей в соответствующих подразделениях.

В «каркасных расписаниях» так же, как и при изготовлении комплектующих партиями, имеется возможность сокращать вынужденные простои производственных подразделений передачей части обработанных партий из обрабатываемой группы в подразделение, следующее по маршруту ее обработки, если оно уже освободилось.

Построенное «каркасное» расписание позволяет достаточно быстро сформировать предварительный вариант согласованного расписания работ для предприятия. Формирование этого расписания, которое в дальнейшем будем называть «развернутым каркасным» или «распакованным каркасным» расписанием, удобно пояснять в процессе построения для него диаграммы Гантта. В диаграмме Гантта, предназначенной для «развернутого каркасного» или «распакованного каркасного» расписания, выделяется отдельная ось абсцисс для каждого оборудования любого подразделения предприятия. По каждой из осей откладываются времена обработки комплектующих, изготавливаемых на оборудовании подразделения, соответствующем оси.

Здесь следует напомнить, что расписания обработки всех групп комплектующих уже строились для тех подразделений, в которых эти группы должны обрабатываться согласно технологии их изготовления, поскольку по ним определялись времена их обработки для построения «каркасного» расписания.

Поэтому «развернутое каркасное» или «распакованное каркасное» расписание формируется путем размещения в диаграмме Гантта на позициях каждого подразделения и на осях, соответствующих тому же оборудованию, уже построенных расписаний обработки групп комплектующих в этом подразделении. Построенные расписания обработки групп комплектующих размещаются на позициях каждого подразделения в том же порядке, который был получен при построении «каркасного» расписания. Размещение расписания обработки следующей группы комплектующих в каждом подразделении на диаграмме «развернутого каркасного» расписания возможно только после завершения обработки последней комплектующей из предыдущей группы.

В связи с этим времена завершения работ по «развернутому каркасному» и «каркасному» расписаниям будут совпадать. Сформированное по такой схеме «развернутое каркасное» расписание будет согласованным распи-

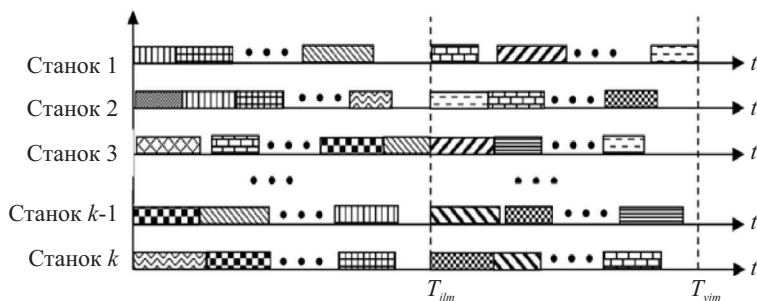


Рис. 2. Диаграмма Гантта «каркасного» расписания обработки i -й и v -й смежных групп комплектующих J -го изделия.

санием на уровне предприятия. Это справедливо, поскольку в данном расписании обработка каждой комплектующей начинается на любом используемом оборудовании предприятия только когда завершится ее обработка на предыдущем оборудовании по технологическому маршруту изготовления этой комплектующей.

Однако в таком расписании работ имеется много «невынужденных» простоев оборудования при обработке смежных групп комплектующих, что делает это расписание не совсем удачным.

Это видно, если построить диаграмму Гантта, содержащую фрагмент такого расписания (см. рис. 2, на котором показано расписание обработки i -й и v -й смежных групп комплектующих l -го изделия в m -м подразделении).

Простои оборудования в таких расписаниях возникают из-за правил построения «каркасных» расписаний. По этим правилам обработку в подразделении следующей группы комплектующих можно начать только после окончания обработки последней комплектующей из предыдущей группы, а освободившееся оборудование от обработки комплектующих из предыдущей группы будет простаивать. Поэтому длительность выполнения работ, полученная с помощью такого расписания, из-за подобных простоев будет увеличенной, и использовать его в качестве расписания работ предприятия, как уже отмечалось, нецелесообразно.

Подобные простои могут быть сокращены в результате выполнения операции «склеивания» расписаний. После ее выполнения оборудование, освободившееся от обработки комплектующих обрабатываемой группы в каждом подразделении, по возможности сразу начинает использоваться для обработки комплектующих следующей группы.

Как уже отмечалось, размерность «каркасного» расписания будет значительно меньше размерности исходного расписания. Поэтому во многих случаях такое расписание в отличие от исходного расписания может быть построено с помощью существующих методов за приемлемое время.

Кроме того, как уже отмечалось ранее, на основе «каркасного» расписания может быть построено «развернутое каркасное» расписание, которое яв-

ляется согласованным расписанием на уровне предприятия. После операции «склеивания» из «развернутого каркасного» расписания может быть получено согласованное расписание для предприятия, определяющее последовательность, не нарушающую технологию обработки комплектующих на всем оборудовании предприятия.

В связи с тем, что здесь рассматривалось использование идей агрегирования для построения расписаний работ на предприятиях машиностроения, то предполагалось возможным построение всех необходимых расписаний работ.

Однако в некоторых случаях, особенно когда расписания требуется строить на предприятиях, имеющих в своем составе большое количество подразделений и оборудования в них, а также обрабатывающих большое количество комплектующих, могут возникать значительные проблемы. Одна из этих проблем связана со слишком большой размерностью возникающих расписаний работ, что может приводить к недопустимо большому времени построения расписаний.

4. Построение расписаний обработки большой размерности

Рассмотрим принципы и особенности построения расписаний работ большой размерности, которые возникают на предприятиях, имеющих в своем составе большое количество подразделений и оборудования в них, а также обрабатывающих большое количество комплектующих.

Размерность расписаний работ на таких предприятиях, как уже отмечалось, оказывается чрезвычайно большой. Поэтому существующие методы непригодны для построения подобных расписаний работ.

Для их построения необходима разработка специальных методов. Методы, позволяющие формировать такие расписания, предлагается строить с использованием идей и принципов описанного выше метода построения «каркасных» расписаний. В создаваемых методах предусматривается возможность в случае, когда размерность «каркасного» расписания остается слишком большой, выполнять дополнительные итерации. На каждой из таких итераций выполняется новый этап агрегирования.

На каждом этапе агрегирования производят объединение выбранных подразделений с предыдущего этапа и формирование групп комплектующих, которые будут обрабатываться в них. Рекомендуется объединять от двух до 7–10 подразделений. Подразделениям, полученным в результате объединения подразделений с предыдущего этапа, и формируемым группам комплектующих, которые в них будут обрабатываться, присваивается номер текущего этапа. Более подробно формирование групп комплектующих будет рассмотрено в следующем разделе.

После формирования подразделений на новом этапе агрегирования формируются группы комплектующих, которые должны обрабатываться в этих подразделениях. В каждую группу комплектующих нового этапа включа-

ются группы комплектующих предыдущего этапа, которые в соответствии с технологией изготовления должны поступать на обработку в одни и те же подразделения нового этапа.

В связи с этим количество групп комплектующих нового этапа не может превышать количество групп комплектующих предыдущего этапа. Если же в некоторые группы комплектующих нового этапа будет включено хотя бы несколько групп комплектующих предыдущего этапа, то количество групп комплектующих нового этапа будет заметно меньше количества групп комплектующих предыдущего этапа. Кроме того, из-за объединения подразделений, которое производится на каждом этапе агрегирования, их количество на новом этапе будет меньше, чем на предыдущем этапе.

Поэтому размерность «каркасного» расписания по обработке групп комплектующих в подразделениях после выполнения этапа агрегирования может быть только меньше размерности «каркасного» расписания до выполнения этого этапа и во многих случаях значительно меньше. В процессе реализации этапов агрегирования целесообразно в качестве объединенных подразделений выбирать подразделения предприятия следующего уровня, в состав которых входит несколько объединяемых подразделений предыдущего этапа. Например, для таких подразделений, как производственные участки, подразделениями следующего уровня являются производственные цеха, содержащие несколько участков, которые предполагается объединить.

Для более четкого и ясного описания подхода к построению «каркасных» расписаний большой размерности удобно ввести следующие обозначения.

Первоначально сформированные подразделения или группы оборудования будем называть подразделениями или группами оборудования 1-го этапа. Группы комплектующих, обрабатываемых в этих подразделениях или группах оборудования, будем называть группами комплектующих 1-го этапа.

Сформированные на втором этапе агрегирования подразделения будем называть подразделениями 2-го этапа. Группы комплектующих, обрабатываемые в этих подразделениях, будем называть группами комплектующих 2-го этапа. Каждая группа комплектующих 2-го этапа формируется по тому же правилу, что и группа комплектующих 1-го этапа. По этому правилу все комплектующие группы комплектующих 2-го этапа доставляются в одном порядке для обработки в одни и те же подразделения или группы оборудования 2-го этапа.

По аналогии с этим, сформированные на n -м этапе агрегирования подразделения будем называть подразделениями n -го этапа, каждую группу комплектующих, сформированную на n -м этапе, – группой комплектующих n -го этапа. Каждая группа комплектующих n -го этапа формируется по тому же правилу, что и группа комплектующих 1-го и 2-го этапов.

Подразделения на каждом этапе агрегирования, начиная со второго, формируются из подразделений предыдущего этапа. Группы комплектующих на

каждом этапе агрегирования, начиная со второго, также формируются из групп комплекующих предыдущего этапа.

Принципы создания и использования подобных методов удобно рассмотреть на примере, когда большая размерность строящегося расписания работ на предприятии приводит к непреодолимым затруднениям.

Пусть расписания обработки групп комплекующих в подразделениях предприятия могут быть построены с помощью существующих методов за приемлемое время. Однако размерность «каркасного» расписания оказывается слишком большой, и для его построения с помощью существующих методов потребуется недопустимо большое время.

После объединения некоторых подразделений и формирования групп комплекующих, которые будут обрабатываться в них, в процессе выполнения этапа агрегирования можно оценить возможность построения «каркасного» расписания на предприятии. Такая оценка может производиться по количествам подразделений и групп комплекующих, которые после их формирования будут известны.

Здесь следует отметить, что предварительная оценка возможности построения «каркасного» расписания является весьма важной, и ее целесообразно использовать для принятия решения о построении расписаний. Дело в том, что существующие методы построения расписаний позволяют достаточно быстро и устойчиво строить хорошие расписания работ [1–3], когда количество деталей и единиц оборудования не является значительным. При увеличении количества деталей и единиц оборудования время построения расписания работ будет расти. Однако начиная с некоторых значений этих величин рост времени построения расписаний будет почти экспоненциальным. Для построения расписания при больших значениях таких величин может потребоваться недопустимо большое время.

Для каждого метода построения расписаний значения величин, с которых начнется резкий рост времени построения расписаний, будут разными. Понять и оценить в процессе построения расписания время, которое еще потребуется затратить, очень сложно.

Поэтому использование имеющихся методов без предварительных оценок возможности построения расписания может привести к весьма значительным затратам времени, и очень часто завершить построение требуемого расписания за приемлемое время не удастся.

Продолжим рассмотрение примера, в котором могут быть построены расписания и определены времена обработки всех групп комплекующих в подразделениях предприятия, где они обрабатываются. Однако чрезвычайно большая размерность «каркасного» расписания не позволяет его построить с помощью существующих методов.

В этом случае предлагается выполнять следующий этап агрегирования, который будет вторым. На этом этапе производится объединение подразделений 1-го этапа и формирование подразделений 2-го этапа.

Затем из групп комплектующих 1-го этапа производится формирование групп комплектующих 2-го этапа. Более подробно процесс формирования групп комплектующих будет описан в следующем разделе.

После формирования групп комплектующих производится проверка возможности построения «каркасного» расписания, поскольку размерность «каркасного» расписания после выполнения каждого этапа агрегирования может только сократиться.

Если проверка не подтвердит возможность построения «каркасного» расписания, то выполняется следующий этап агрегирования. В противном случае строится «каркасное» расписание, и после его построения формируется «развернутое каркасное» расписание. На основе этого расписания, после выполнения операции «склеивания», формируется расписание, которое может использоваться для планирования и управления работой предприятия.

Однако и для построения «каркасного» расписания, и для выполнения следующего этапа агрегирования приходится строить расписания, а также определять времена обработки сформированных групп комплектующих в тех сформированных подразделениях, где они должны обрабатываться.

Для определения времени обработки сформированной группы комплектующих 1-го этапа в подразделении 1-го этапа, в котором эта группа должна обрабатываться, строится ее расписание обработки в этом подразделении.

На этапах агрегирования, начиная со второго, для построения расписания работ групп комплектующих в сформированных подразделениях предлагается сначала строить «каркасные» расписания.

Целесообразность построения «каркасного» расписания обусловлена следующими обстоятельствами.

Во-первых, существующие методы могут оказаться непригодными для построения расписаний обработки комплектующих из сформированных групп в подразделениях нового этапа, состоящих из многих подразделений предыдущего этапа.

С использованием «каркасных» расписаний могут быть построены расписания очень большой размерности.

Во-вторых, для всех групп комплектующих предыдущего этапа уже были построены расписания, а также известны времена их обработки в подразделениях предыдущего этапа, в которых они обрабатываются.

Вряд ли целесообразно многократно строить расписания одних и тех же комплектующих в одних и тех же подразделениях. Для построения «каркасных» расписаний повторного построения уже построенных расписаний не требуется. В тех случаях, когда для части обрабатываемых в подразделении комплектующих уже были построены фрагменты расписаний, такие фрагменты расписаний и времена их выполнения используются при построении «каркасных» расписаний и не строятся заново.

Действительно, на каждом этапе агрегирования, начиная со второго, производится формирование новых подразделений и групп комплектующих этого этапа. Такие подразделения, как уже отмечалось, формируются путем объединения подразделений предыдущего этапа, состав которых известен для каждого сформированного подразделения.

Каждая группа комплектующих нового этапа также состоит из групп комплектующих предыдущего этапа, которые поступают на обработку в одном порядке в одни и те же подразделения данного этапа. Состав этих групп предыдущего этапа также известен для каждой сформированной группы комплектующих этого этапа. Для каждой группы комплектующих предыдущего этапа известны времена и последовательность обработки в подразделениях предыдущего этапа.

Поэтому для определения времени обработки сформированной группы комплектующих нового этапа в сформированном подразделении нового этапа, в котором эта группа обрабатывается, можно строить «каркасное» расписание.

Такое «каркасное» расписание является расписанием обработки групп комплектующих предыдущего этапа, которые включены в состав сформированной группы комплектующих нового этапа, в подразделениях предыдущего этапа, объединенных в таком подразделении нового этапа.

После построения «каркасного» расписания на его основе по описанной выше схеме может быть сформировано «развернутое каркасное» расписание, из которого с помощью операции «склеивания» получается достаточно хорошее расписание работ в соответствующем подразделении. В качестве времени обработки комплектующих в этом подразделении выбирается время завершения обработки последней комплектующей на оборудовании подразделения.

Кроме того, для построения «каркасных» расписаний в сформированных подразделениях могут использоваться существующие методы, поскольку при формировании подразделений рекомендуется объединять весьма ограниченное количество подразделений предыдущего этапа.

Как уже отмечалось, после каждого этапа агрегирования количество групп комплектующих не может возрастать, что с уменьшением количества подразделений приводит к сокращению размерности «каркасного» расписания. Поэтому после выполнения ряда этапов агрегирования количество групп комплектующих и количество сформированных подразделений может настолько сократиться, что появится возможность с использованием имеющихся методов построить «каркасное» расписание практически для любого машиностроительного предприятия.

После построения «каркасного» расписания на его основе без принципиальных затруднений может быть получено достаточно хорошее расписание работ на этом предприятии. Такое расписание может использоваться для управления и планирования работы предприятия, а также позволит опреде-

лять последовательность обработки и времена начала и окончания обработки всех комплектующих на любом оборудовании предприятия.

Если после выполнения этапа агрегирования полученные оценки показали, что построение «каркасного» расписания может вызвать затруднения или построить его за допустимое время не удалось, то выполняется следующий этап агрегирования. Этот этап выполняется по аналогии с описанным выше предыдущим этапом агрегирования.

Рассмотрим теперь другую ситуацию, которая может возникать при построении расписаний обработки групп комплектующих в некоторых подразделениях на первом этапе агрегирования.

В этой ситуации полученные оценки показывают, что построение расписаний работ в этих подразделениях с помощью имеющихся методов может вызвать затруднения. Такая ситуация обычно возникает при неудачном выборе некоторых подразделений со слишком большим количеством оборудования. Кроме того, подобная ситуация может возникать из-за слишком большого количества комплектующих, для которых надо строить расписания обработки, а также из-за одновременного наличия этих факторов.

При возникновении этой ситуации оборудование каждого подразделения, в котором для построения расписания работ требуется слишком большое время, предлагается разделить на подгруппы.

Количество подгрупп, на которые предлагается разделять такие подразделения, желательно выбирать так, чтобы в разные подгруппы разделяемого подразделения не попадало оборудование одного типа. В противном случае возникнут проблемы при формировании подгрупп комплектующих, направляемых в такие подгруппы разделяемого подразделения для обработки.

Кроме того, подгруппы и их количество желательно выбирать так, чтобы в них можно было за приемлемое время с помощью имеющихся методов строить расписания работ направляемых на обработку подгрупп комплектующих.

Для каждой подгруппы разделяемого подразделения формируют подгруппы комплектующих, которые будут обрабатывать на оборудовании этой подгруппы. Такие подгруппы комплектующих формируются из комплектующих, которые были направлены для обработки в разделяемое подразделение. Подгруппы комплектующих формируются по правилу, использованному ранее. Согласно этому правилу, все комплектующие каждой подгруппы в одном порядке должны поступать на обработку в эти подгруппы оборудования и в остальные подразделения предприятия согласно технологии их изготовления. В такие подгруппы должны быть включены все комплектующие, направленные для обработки в разделяемое подразделение.

После этого должно строиться расписание обработки подгрупп комплектующих в тех подгруппах подразделений, в которых они должны обрабатываться по технологии изготовления. Проверку возможности построения таких расписаний в сформированных подгруппах, как и ранее, предлагается про-

изводить с использованием граничных значений используемых методов по описанной выше схеме.

В тех случаях, когда превышений граничных значений нет, целесообразно с использованием имеющихся методов построить такие расписания и из них определить времена завершения обработки.

Если удалось построить все эти расписания, то проверяется возможность построения «каркасного» расписания обработки подгрупп комплекующих в подгруппах разделяемого подразделения.

Если превышений граничных значений нет, то целесообразно построить такое «каркасное» расписание. В случае удачного построения «каркасного» расписания на его основе формируется «развернутое» расписание. После операции «склеивания» из «развернутого» расписания может быть получено согласованное расписание работ в разделяемом подразделении и из него определено время завершения этих работ. Если в каких-либо подгруппах разделяемого подразделения при обработке соответствующих подгрупп комплекующих имеется превышение граничных значений, то такие подгруппы разделяются на более мелкие подгруппы, и для них повторяется описанная выше процедура.

Если при проверке возможности построения с помощью имеющихся методов «каркасного» расписания обработки подгрупп комплекующих в разделяемом подразделении оказалось, что могут возникнуть затруднения, то по описанной выше схеме выполняется этап агрегирования.

5. Принципы и особенности формирования групп комплекующих

Рассмотрим кратко основные принципы и особенности формирования групп комплекующих.

Формирование групп комплекующих рассмотрим сначала на группах комплекующих 1-го этапа. Эти комплекующие при формировании групп комплекующих предварительно распределяют по уровням и нумеруют. Каждый уровень соответствует количеству подразделений, в которых изготавливаются комплекующие, распределенные на этот уровень. На первый уровень попадают комплекующие, которые обрабатываются в одном подразделении. На последний k_1 -й уровень попадают комплекующие, которые обрабатываются в наибольшем количестве подразделений предприятия. С комплекующих последнего k_1 -го уровня начинается их нумерация, которая последовательно производится по уровням комплекующих и заканчивается на комплекующих низшего уровня.

Группы комплекующих обычно начинают формировать с выбора базовой комплекующей для первой группы. В качестве первой базовой комплекующей для первой формируемой группы обычно выбирается комплекующая последнего k_1 -го уровня, которой при нумерации присвоен первый номер. Затем в качестве проверяемой выбирается следующая комплекующая последнего k_1 -го уровня. После этого начинается сравнение последовательности

подразделений предприятия, в которых обрабатываются проверяемая комплектующая и базовая комплектующая формируемой группы.

Если последовательности доставки на обработку в подразделения предприятия базовой и проверяемой комплектующих совпадают, то проверяемая комплектующая может быть включена в группу, определяемую этой базовой комплектующей.

Если эти последовательности различаются, то сравниваются между собой последовательности доставки на обработку в подразделения базовой и следующей по номеру проверяемой комплектующих. Ранее проверяемая комплектующая в этом случае будет базовой комплектующей для следующей группы комплектующих.

Затем производится сравнение первой базовой комплектующей и следующей по номеру проверяемой комплектующей.

Если при сравнении последовательности доставки на обработку в подразделения этих комплектующих совпадают, то проверяемая комплектующая включается в группу, определяемую этой базовой комплектующей.

В противном случае производится сравнение последовательности доставки на обработку в подразделения этой проверяемой и ранее полученной другой базовой комплектующих.

Если эти последовательности совпадут, то проверяемая комплектующая включается в группу комплектующих, определяемых этой базовой комплектующей, и выбирается следующая по номеру проверяемая комплектующая.

Последовательность доставки на обработку в подразделения каждой проверяемой комплектующей поочередно сравнивается с последовательностью доставки на обработку в подразделения ранее полученных базовых комплектующих.

Если последовательности доставки на обработку в подразделения проверяемой комплектующей совпадут с последовательностью доставки какой-либо из ранее полученных базовых комплектующих, то проверяемая комплектующая включается в группу, определяемую этой базовой комплектующей. В противном случае проверяемая комплектующая будет базовой комплектующей для следующей группы.

Такой процесс продолжается до завершения распределения комплектующих k_1 -го уровня по формируемым группам.

После завершения распределения комплектующих k_1 -го уровня по формируемым группам почти по аналогии производится распределение по созданным и новым группам комплектующих $(k_1 - 1)$ -го, $(k_1 - 2)$ -го, ..., 2-го и 1-го уровней.

Однако последовательности доставки на обработку в подразделения предприятия комплектующих меньших уровней не могут совпадать с аналогичными последовательностями базовых комплектующих, поскольку уровень последних выше.

Поэтому предлагается рассматривать следующие возможности включения проверяемой комплектующей в формируемую группу комплектующих.

Одна из возможностей включения проверяемой комплектующей заключается в том, что последовательность подразделений ее обработки является фрагментом в подобной последовательности базовой комплектующей.

Под фрагментом в последовательности подразделений базовой комплектующей здесь понимается часть этой последовательности от подразделения, с которого начинается фрагмент, и до подразделения, его завершающего, без пропуска подразделений последовательности.

Другая возможность включения заключается в том, что последовательность доставки на обработку в подразделения предприятия проверяемой комплектующей является подпоследовательностью подобной последовательности базовой комплектующей. В этом случае между подразделениями, в которых обрабатываются проверяемая и базовая комплектующие, могут быть подразделения, в которых обрабатывается базовая, но не обрабатывается проверяемая комплектующая.

При использовании первого принципа формирования групп комплектующих создается большее количество таких групп, что может затруднить построение «каркасного» расписания обработки комплектующих на предприятиях. В ряде случаев такие затруднения могут оказаться весьма значительными.

При использовании второго принципа формирования групп комплектующих удастся получить меньшее количество групп комплектующих, что упрощает построение «каркасного» расписания обработки комплектующих на предприятиях.

Весьма полезным бывает подход, в котором сначала используется первый принцип формирования групп комплектующих. Затем, если будет получено очень большое количество сформированных групп комплектующих, объединить часть групп, чтобы сократить их количество до приемлемой величины. Объединение групп целесообразно производить с использованием базовых комплектующих этих групп.

При формировании групп комплектующих целесообразно принимать во внимание то, что многие комплектующие, особенно обрабатываемые в небольшом количестве подразделений, могут быть включены в различные группы. Если такие комплектующие включать в группы, в которых их требуется обрабатывать на оборудовании подразделений, наиболее загруженном обработкой уже включенных в эти группы комплектующих, то время обработки групп после их включения может заметно увеличиться.

Рассмотрим особенности формирования групп комплектующих на втором и последующих этапах агрегирования.

Группы комплектующих нового этапа агрегирования формируются после формирования подразделений, в которых они будут обрабатываться, и формируются из групп комплектующих предыдущего этапа.

Однако на новом этапе агрегирования из-за объединения ряда подразделений уровень базовых комплектующих предыдущего этапа и определяемых ими групп комплектующих может заметно измениться.

Такое изменение может произойти, например, в случае, когда базовая комплектующая одной группы обрабатывалась в подразделениях некоторого этапа, которые после агрегирования вошли в состав разных подразделений следующего этапа. В то время как базовая комплектующая другой группы обрабатывалась в большем количестве подразделений того же этапа, которые вошли группами в существенно меньшее количество подразделений или вообще в одно подразделение следующего этапа.

Поэтому эти комплектующие для формирования групп комплектующих нового этапа должны быть распределены по новым уровням с учетом состава и количества подразделений на данном этапе, а также пронумерованы.

В этом случае, как и ранее, каждый уровень соответствует количеству подразделений данного этапа, в которых изготавливаются базовые комплектующие, распределенные на этот уровень. На первый уровень попадают группы комплектующих, которые обрабатывают в одном подразделении этого этапа. На последний k_r -й уровень, где r указывает этап агрегирования, попадают комплектующие, которые обрабатывают в наибольшем количестве подразделений предприятия, сформированных на этом этапе агрегирования.

Нумерация базовых комплектующих начинается с комплектующих последнего k_r -го уровня, последовательно производится по меньшим уровням комплектующих и заканчивается на комплектующих низшего уровня. После этого в соответствии с описанной выше схемой производится формирование групп комплектующих нового этапа.

6. Некоторые особенности и свойства «каркасных» расписаний на предприятиях машиностроения

Отметим и кратко обсудим назначение и основные свойства «каркасных» расписаний по обработке групп комплектующих в подразделениях предприятий и на предприятиях с дискретным характером производства.

«Каркасные» расписания целесообразно строить на предприятиях и в больших подразделениях предприятий в тех случаях, когда для них требуется построить расписания работ, но существующие методы оказываются непригодными для этого. Такая ситуация возникает из-за значительной размерности расписаний, которые требуется построить.

В подобных случаях с помощью предложенного метода, в котором используются принципы последовательного агрегирования, удастся строить «каркасные» расписания. Возможность построения «каркасных» расписаний практически для любых предприятий с дискретным характером производства обусловлена тем, что построение таких расписаний производится по этапам.

На первом этапе выбираются или формируются подразделения первого этапа. Эти подразделения желательно выбирать или формировать так, чтобы с помощью имеющихся методов в них могло быть построено расписание работ. Проверка возможности построения расписания работ в этих подразделениях может быть проведена по схеме, описанной в разделе 4.

Если с помощью имеющихся методов во всех сформированных подразделениях удастся построить расписание работ, то по той же схеме производится проверка возможности построения «каркасного» расписания.

Если расписание в подразделении может быть построено, то оно строится. В противном случае оборудование каждого подразделения, в котором проведенная проверка выявила затруднения при построении расписания, разделяют на подгруппы. Затем по описанной в разделе 4 схеме в этом подразделении строится «каркасное» расписание, после ряда преобразований которого получается хорошее расписание работ в этом подразделении.

После построения расписаний работ во всех сформированных подразделениях производится проверка возможности построения «каркасного» расписания на предприятии.

Если с помощью имеющихся методов «каркасное» расписание может быть построено, то оно строится. В противном случае по описанной в разделе 4 схеме выполняется следующий этап агрегирования, в результате выполнения которого размерность «каркасного» расписания снижается. После этого производится проверка возможности построения «каркасного» расписания, и весь описанный выше процесс повторяется до тех пор, пока размерность такого расписания не окажется подходящей для имеющихся методов, и оно будет построено.

Таким образом, «каркасное» расписание может быть построено практически для любых предприятий с дискретным характером производства. На основе построенного «каркасного» расписания без каких-либо принципиальных затруднений формируется «развернутое каркасное» или «распакованное каркасное» расписание работ. Из этого расписания после операции «склеивания» получается хорошее расписание работ также для любых предприятий с дискретным характером производства.

«Каркасное» расписание», построенное для предприятия, является согласованным расписанием, в котором обеспечено выполнение технологии изготовления каждой обрабатываемой партии комплектующих.

Действительно, по правилам формирования «каркасных» расписаний комплектующие каждой сформированной группы доставляются на обработку в подразделения согласно маршруту обработки группы. Поэтому все обрабатываемые комплектующие в составе сформированных групп доставляются на обработку в те подразделения, в которых их должны обрабатывать по технологии изготовления.

В каждом подразделении, в которое доставляется группа комплектующих, строится расписание ее обработки. Расписание в подразделении строится в

соответствии с технологическим маршрутом обработки каждой комплектующей этой группы. Поэтому в построенном «каркасном» расписании будет выполняться технология обработки каждой изготавливаемой партии комплектующих.

Построенное «каркасное» расписание позволяет получать очень неплохие оценки «сверху» на время завершения работ на предприятии, что весьма полезно для планирования деятельности предприятий.

«Каркасные» расписания, как и обычные расписания обработки деталей в производственных системах и участках, можно представлять с помощью диаграмм Гантта.

Для построения «каркасных» расписаний работ необходимо определять времена обработки групп комплектующих в подразделениях предприятий, где эти группы обрабатываются. Эти времена определяются из расписаний обработки групп комплектующих в соответствующих подразделениях предприятий. Построение таких расписаний можно производить независимо друг от друга и в любом порядке. Поэтому имеется возможность распараллеливать их построение, что позволяет заметно сократить время определения длительности обработки групп комплектующих в подразделениях предприятий. Это приведет к сокращению времени построения «каркасного» расписания.

7. Заключение

В работе предлагается метод, в котором используются принципы последовательного агрегирования, позволяющие строить расписания работ очень большой размерности для предприятий машиностроения. В предлагаемом методе достаточно просто может быть организовано распараллеливание вычислений. Это позволит значительно сократить время построения расписаний.

Построение расписаний работ для предприятий, имеющих в своем составе большое количество оборудования и обрабатывающих значительное количество комплектующих, позволит:

- использовать возможности методов теории расписаний для повышения эффективности работы и сокращения сроков изготовления поступающих заказов;

- строить согласованные планы и расписания работ, в которых определены время начала и завершения всех операций на всем оборудовании подразделений предприятия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Pinedo M.L.* Scheduling. Theory, Algorithms, and Systems. Sixth Edition. Leipzig: Springer, 2022.
2. *Brucker 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.
5. *Хоботов Е.Н.* Модели выбора оборудования для модернизации предприятий с конвейерной сборкой изделий // *АиТ.* 2024. № 10. С. 40–57.
6. *Хоботов Е.Н.* Задачи и методы построения расписаний работ для предприятий со ступенчатой сборкой выпускаемых изделий // *АиТ.* 2023. № 12. С. 80–95.

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

Поступила в редакцию 08.07.2025

После доработки 08.09.2025

Принята к публикации 20.11.2025