

Мауэргауз Ю.Е.

**ДИНАМИЧЕСКИЕ РАСПИСАНИЯ  
ДЛЯ ГИБКИХ ПРОИЗВОДСТВ****12** компьютерных программ**12**  
компьютерных  
программ

В книге описывается набор из двенадцати компьютерных программ, имеющих общий алгоритм, основанный на двух критериях: суммарной функции полезности заказов и стоимости переналадки гибкого производства, причем функция полезности каждого заказа вычисляется по его производственной напряженности. Во всех программах учитывается календарный график работы цеха, в различных программах используются отдельные ограничения, указанные выше.

Программы выполнены в виде макросов MS Excel на языке VBA, которые обрабатывают данные, расположенные на листах MS Excel. Результаты выводятся как в виде текстовых записей, так и виде диаграмм в векторной графике. Тексты программ являются доступными для чтения.

Мауэргауз Ю.Е.

**ДИНАМИЧЕСКИЕ РАСПИСАНИЯ  
ДЛЯ ГИБКИХ ПРОИЗВОДСТВ**

Юрий Мауэргауз – инженер-механик, окончивший Одесский политехнический институт в 1963 г. Работая в оборонной промышленности в Казахстане, он в 1970 г. защитил диссертацию на степень к.т.н. в Ленинградском ЦНИИ «Гидроприбор» в области подводного оружия. В дальнейшем большинство его работ связано с планированием и управлением промышленным производством на ряде заводов и исследовательских институтов. Работая в качестве доцента в Уральском и Одесском политехническом институтах, преподавал применения компьютерной техники для управления производством. В настоящее время является консультантом Московского инженерно-внедренческого центра ИВЦ Информ. Опубликовал более 50 научных работ и 5 книг по производственному планированию на русском и английском языках.



Серия книг

**«Классика операционного менеджмента»**

ISBN 978-5-9906448-1-6



9 785990 644816



# Динамические расписания для гибких производств

12 компьютерных программ

*Динамичность цехового планирования обуславливается всей совокупностью событий, происходящих в производственном подразделении за некоторый плановый период. Последовательность работ в расписании существенно зависит не только от длительности и срока их выполнения, но также от стоимости переналадки машин, их первоначальной настройки, календарного графика работы цеха, обеспеченности операторами, от износа инструментов, графика обслуживания машин, графика поставки материалов и других необходимых ресурсов.*

Программы размещены на прилагаемом компакт-диске (или доступны для загрузки по коду, размещённому на стр. 313) и выполнены в виде макросов MS Excel на языке VBA, которые обрабатывают данные, расположенные на листах MS Excel.

Рецензенты:

Д.т.н., профессор Бурков В.Н.

Д.ф.-м.н., профессор Лазарев А.А.

Институт проблем управления РАН

УДК 658.51

ББК 65.05

### **Ю.Е. Мауэргауз**

Динамические расписания для гибких производств: 12 компьютерных программ / Мауэргауз Ю.Е., М.:ИГСС – 2018, 312 стр. с илл.

В книге описывается набор из двенадцати компьютерных программ, имеющих общий алгоритм, основанный на двух критериях: суммарной функции полезности заказов и стоимости переналадки гибкого производства, причем функция полезности каждого заказа вычисляется по его производственной напряженности. Во всех программах учитывается календарный график работы цеха, в различных программах используются отдельные ограничения, указанные выше.

Программы охватывают большинство используемых цеховых машинных структур: одиночные машины различных типов; не одинаковые параллельные машины с работой «под заказ» и «на склад»; гибкие поточные линии как в дискретном, а так и в процессном производстве; универсальное производство; планирование работы производственных бригад.

Программы выполнены в виде макросов MS Excel на языке VBA, которые обрабатывают данные, расположенные на листах MS Excel. Результаты выводятся как в виде текстовых записей, так и в виде диаграмм в векторной графике. Тексты программ являются доступными для чтения.

Книга может быть полезна всем специалистам в области организации и планирования производства, студентам и аспирантам технических ВУЗов, пользователям и разработчикам прикладного программного обеспечения класса ERP и MES.

Книга подготовлена и издана при поддержке Российского MES-центра  
[www.MEScenter.ru](http://www.MEScenter.ru)

**ISBN 978-5-9906448-1-6**

© Мауэргауз Ю.Е., 2018  
Вёрстка © ООО «Нефтегазсофтсервис», 2018  
Обложка Бондарева Е.Б., 2018  
[www.ogss.ru](http://www.ogss.ru)

# Оглавление

<b>Предисловие рецензентов</b>	<b>1</b>
<b>Предисловие автора</b>	<b>3</b>
<b>Глава 1. Базовые сведения о производственных расписаниях</b>	<b>7</b>
1.1 Место производственных расписаний в процессе планировании . . . . .	7
1.2 Масштаб и стратегия производства . . . . .	9
1.3 Календарно-плановые нормативы . . . . .	11
1.4 Критерии качества планирования . . . . .	13
1.5 Стандартная классификация оптимизационных моделей планирования . . . . .	15
1.6 Гибкое производство . . . . .	17
<b>Глава 2. Ежедневное планирование</b>	<b>19</b>
2.1 Групповые методы при составлении расписаний	19
2.2 Правила приоритета . . . . .	21
2.3 Динамические расписания . . . . .	23
2.4 Алгоритмы динамического планирования . . . . .	27
2.5 Составление расписаний при нескольких критериях выбора . . . . .	28
<b>Глава 3. Построение многокритериальных динамических расписаний</b>	<b>31</b>
3.1 Понятие производственной напряженности . . . . .	31
3.2 Функция текущей полезности заказа . . . . .	34
3.3 Построение дерева расписания . . . . .	37
3.4 Критерии отсечения ветвей . . . . .	39
3.5 Типовой алгоритм построения расписания . . . . .	44
3.6 Вычисление интегралов напряженности заказов	47
<b>Глава 4. Стандартные функции для расчета расписаний</b>	<b>55</b>
4.1 Функции расчета интегралов напряженности . . . . .	55
4.2 Функция вызова интегралов напряженности	56
4.3 Функции расчета критериев . . . . .	57
4.4 Функция пересчета трудоемкости работы к календарным часам	58
4.5 Функция поступления работ на машину в рабочее время . . . . .	63
4.6 Функция числа рабочих часов в заданном календарном сроке . . . . .	64
4.7 Функция определения возможности начала непрерывного процесса . . . . .	65
4.8 Вспомогательные функции . . . . .	68
4.9 Функции графического отображения результатов планирования	69

<b>Глава 5. Построение расписания для одиночной машины с последовательным выполнением работ</b>	<b>73</b>
5.1 Введение . . . . .	73
5.2 Исходные данные для группового последовательного выполнения работ на одиночной машине . . . . .	75
5.3 Работа с программой . . . . .	76
5.4 Анализ результатов планирования . . . . .	79
5.5 Блок-схема программы . . . . .	81
5.6 Листинг основной части программы . . . . .	83
5.7 Перепланирование расписания . . . . .	92
5.8 Моделирование расписания . . . . .	97
5.9 График загрузки и критический горизонт планирования . . . . .	98
5.10 Планирование и перепланирование при выполнении работ с большой длительностью . . . . .	101
<b>Глава 6. Расписание для одиночной машины с группами одновременно выполняемых работ</b>	<b>105</b>
6.1 Введение . . . . .	105
6.2 Исходные данные для группового выполнения работ на одиночной машине . . . . .	106
6.3 Работа с программой . . . . .	106
6.4 Анализ результатов планирования . . . . .	108
6.5 Блок-схема программы . . . . .	110
6.6 Листинг основной части программы . . . . .	110
6.7 Перепланирование расписания . . . . .	118
6.8 Моделирование расписания . . . . .	120
<b>Глава 7. Построение расписания для обрабатывающего центра</b>	<b>123</b>
7.1 Введение . . . . .	123
7.2 Исходные данные для группового выполнения работ на одиночном обрабатывающем центре . . . . .	124
7.3 Работа с программой . . . . .	126
7.4 Анализ результатов планирования . . . . .	128
7.5 Блок-схема программы . . . . .	129
7.6 Листинг основной части программы . . . . .	129
7.7 Перепланирование расписания . . . . .	138
7.8 Моделирование расписания . . . . .	142
<b>Глава 8. Расписания для параллельных машин</b>	<b>145</b>
8.1 Введение . . . . .	145
8.2 Расписания для параллельных машин с последовательным выполнением работ . . . . .	146
8.3 Расписания для параллельных машин с работой «на склад» . . . . .	162
8.4 Расписания для параллельных машин с переналаживаемым формоизменяющим инструментом . . . . .	174
<b>Глава 9. Расписания для гибких поточных линий</b>	<b>185</b>
9.1 Введение . . . . .	185
9.2 Расписания для гибких линий с заданными и постоянными размерами партий . . . . .	186
9.3 Расписания для гибких линий с ограниченными размерами партий . . . . .	199

9.4	Расписания для гибких линий процессного производства с позаказным планированием . . . . .	219
<b>Глава 10.</b>	<b>Расписания для универсального производства</b>	<b>239</b>
10.1	Введение . . . . .	239
10.2	Расписания при заданном наборе работ . . . . .	240
10.3	Расписания при выпуске комплектов деталей на склад . . . . .	253
<b>Глава 11.</b>	<b>Расписания для производственных бригад</b>	<b>275</b>
11.1	Введение . . . . .	275
11.2	Исходные данные задачи	278
11.3	Работа с программой . . . . .	280
11.4	Анализ результатов планирования . . . . .	281
11.5	Листинг основной части программы . . . . .	283
11.6	Коррекция расписания . . . . .	290
<b>Заключение</b>		<b>293</b>
<b>Список литературы</b>		<b>297</b>
<b>Приложения</b>		
	Приложение 1. Список условных обозначений . . . . .	301
	Приложение 2. Пример планирования производства в информационной системе	303

# Предисловие рецензентов

Задачи производственного планирования – это задачи оптимального распределения ограниченных ресурсов во времени. Различные модели и методы производственного планирования рассматриваются в рамках теории расписаний, в которой производится размещение внешних заказов на обрабатывающих машинах. Если для получения готовой продукции достаточно одной машины, такая система является одностадийной, в противном случае система рассматривается как многостадийная. Для дискретного производства существуют одни методы планирования, в то время как для процессного производства обычно используются существенно другие методы. Кроме того, значительно отличаются позаказное планирование и планирование «на склад».

При планировании часто стремятся получить такие варианты расписаний, которые являются оптимальными относительно того или иного критерия. В частности, такими критериями может быть минимизация момента завершения обслуживания всех заказов, минимальное отклонение от заданных директивных сроков и т.д. Выбор такого критерия при реальном планировании часто является для пользователя весьма непростой задачей.

В предлагаемой читателю книге сделана попытка осуществить единообразный подход к самым различным задачам теории расписаний на базе некоторых сравнительно новых представлений о свойствах производственных расписаний – их динамичности. При рассмотрении цехового планирования предполагается, что его динамичность обуславливается всей совокупностью событий за плановый период, причем большинство этих событий имеют значительную случайную составляющую. В книге не рассматривается работа со случайными величинами, но предполагается, что после того, как случайное событие произошло, его учет вполне возможен при помощи детерминированных методов, приводящим к необходимым плановым изменениям

Динамичность расписаний особенно важна для работы с гибкими производствами. Существуют несколько разновидностей гибкости: операционная гибкость отдельной машины; гибкость выпуска различных модификаций продукции; возможность чередования выпуска различной продукции и т.д. Для гибкого производства, прежде всего, необходимо выполнение работ согласно срокам в действующих производственных заданиях. С другой стороны, расписание в этом случае должно способствовать достаточно высокому уровню экономической эффективности производства.

Отметим, что своевременное выполнение заказов, обеспечивающее высокий уровень их выполнения (эффективности), может быть достигнуто, как правило, за счет уменьшения размеров партий, однако это противоречит требованию низкой себестоимости производства. Необходимость одновременного улучшения этих характеристик представляет собой так называемую «дилемму планирования». В книге основным методом решения указанной проблемы является групповое планирование, заключающееся в определении рациональных размеров технологических партий и составлении производственных расписаний. Размеры партий и последовательность их выполнения существенно зависят от объемов и сроков выполнения внешних заказов. Эта связь

формулируется так: изготовление продукции производится партиями, а отгрузка осуществляется по заказам.

В качестве основного метода составления расписания предлагается разработка набора недоминируемых решений, причем окончательное решение, т.е. выбор из предлагаемого набора, остается за пользователем. Для этих целей используются системы поддержки решения, позволяющие проводить моделирование расписаний при различных входных параметрах и выбирать вариант, наиболее подходящий в конкретных условиях.

В качестве примеров «группового» многокритериального планирования описаны 12 задач цеховых расписаний. Для их решения разрабатываются динамические расписания с двумя критериями одновременно: первым критерием является своевременность выполнения заказов, вторым критерием – стоимость обработки и переналадки изготавливаемых объектов. Возможность высокого уровня обслуживания заказчиков (своевременность) в книге рассчитывается с помощью функций текущей полезности заказов, базирующихся на понятии производственной напряженности. На примерах демонстрируется, что предлагаемый метод функций полезности заказов является достаточно устойчивым, причем метод вполне адекватно реагирует на случающиеся изменения, включая необходимость выполнения срочных работ.

Значительную часть книги занимают программы установления соответствия календарных часов расписания и рабочих часов функционирования машин с учетом рабочего календаря. Во всех рассмотренных задачах генерируемые расписания полностью учитывают календарный график работы цеха, включая режим работы каждой смены. Если работа может прерываться (например, в дискретном производстве), программа полностью использует имеющийся резерв суточного рабочего времени. Если график предусматривает нерабочие дни, или рабочий день меньше 24 часов, то в некоторых случаях (например, в процессном производстве) программа предварительно проверяет возможность окончания работы до наступления нерабочего времени. Если резерва времени недостаточно, работа автоматически переносится на следующий рабочий день.

Главной целью монографии является последовательное изложение метода функций полезности заказов для построения рациональных цеховых расписаний. На каждом предприятии есть свои отличия, влияющие на составление расписаний, практическое использование любой из описанных в книге компьютерных программ, как правило, требует их определенную доработку. В монографии достаточно подробно проводится анализ исходных данных поставленных задач, их решений и хорошо проиллюстрирована графически.

Книга будет полезна работникам производственных и вычислительных служб промышленных предприятий и проектных организаций самого различного профиля, студентам, аспирантам и исследователям технических вузов.

*Д.т.н., профессор Бурков В.Н.*

*Д.ф.-м.н., профессор Лазарев А.А.*

*Институт проблем управления РАН*

# Предисловие автора

Обычно полагают [Pinedo, 1995], что предметом составления расписания является распределение ограниченных ресурсов по предстоящим задачам. Это определение, вообще говоря, относится к расписаниям в любой сфере деятельности: производство, транспорт, обучение, сервис и т.д. Однако, по некоторым параметрам расписания по этим направлениям сильно отличаются. Прежде всего, такие отличия заключаются в степени повторяемости основных плановых событий, которые характеризуются моментами поступления заданий для планирования, моментами поступления ресурсов и моментами планового и фактического выполнения расписания.

В ряде видов бизнес-процессов расписания характеризуются прогнозированием плановых событий с очень высокой вероятностью. Именно такие расписания используются для междугородного пассажирского транспорта, проведения учебных занятий, зрелищных мероприятий и т.п. Циклическая повторяемость событий также имеет место в массовом производстве.

При составлении расписания используются два возможных метода: статический и динамический. Статический метод базируется на распределении ресурсов, которое фиксируется до начала функционирования расписания и в дальнейшем не изменяется. При динамическом подходе некоторые (или даже все) параметры расписания могут изменяться по мере его выполнения. Разумеется, использование статического расписания существенно проще, чем динамического, хотя составление статического расписания большого размера может быть достаточно сложным. Очевидно, что статическое расписание может использоваться только при высокой вероятности его осуществления. Во всех тех случаях, когда события, влияющие на выполнение расписания, либо являются случайными, либо имеют значительную случайную составляющую, удовлетворительным может быть только динамическое расписание.

Динамичность цехового планирования обуславливается всей совокупностью событий, происходящих в производственном подразделении за некоторый плановый период. Последовательность работ в расписании существенно зависит не только от длительности и срока их выполнения, но также от стоимости переналадки машин, их первоначальной настройки, календарного графика работы цеха, обеспеченности операторами, от износа инструментов, графика обслуживания машин, графика поставки материалов и других необходимых ресурсов.

Наличие расписания не всегда означает его полного и соответствующего выполнения, но чрезвычайно полезно с точки зрения подготовки и организации производственного процесса. Качество расписания обычно оценивается с нескольких точек зрения. Прежде всего, расписание должно предусматривать выполнение работ согласно срокам в действующих производственных заданиях. С другой стороны, расписание должно способствовать достаточно высокому уровню экономической эффективности производства.

Еще одним фактором оценки динамического расписания является его устойчивость. Т.к. в процессе выполнения производственного расписания очень велика возможность возникновения разнообразных «помех», корректировка расписания, как правило, необходима, но она должна быть не очень значительной.

Динамичность производственных расписаний в рыночной экономике определяется не только, и даже не столько, возможными оперативными сбоями, сколько необходимостью частой перестройки производства исходя из требований заказчиков. Расписания должны отражать требованиям гибкости современного производства, от которой существенно зависит положение предприятия на рынке. В настоящей книге, так же, как и в предыдущей книге автора [Мауэргауз, 2012], последовательно приводятся примеры т.н. «группового» многокритериально-го планирования. Для этого разрабатываются динамические расписания с двумя критериями одновременно: первым критерием является своевременность выполнения заказов, вторым критерием – стоимость обработки и переналадки изготавливаемых объектов.

В первой и второй главах приводятся необходимые для дальнейшего известные сведения в области планирования. В третьей главе излагаются основные понятия о производственной напряженности и функциях полезности заказов. Начиная с четвертой главы, в книге описываются программные модули для различных задач производственных расписаний. Здесь существенную часть занимают программы установления соответствия календарных часов расписания и рабочих часов функционирования машин с учетом рабочего календаря.

Изложение всех задач в книге проводится единообразно, что способствует более простому ознакомлению с ними. Каждая задача решается на числовом примере, данные для которого подробно описываются, а полученное решение анализируется с помощью таблиц и графиков. Кроме того, рассматривается применение каждой задачи в динамике при пересчете в новых условиях – с новой датой планирования и новым заданием. Следует отметить, что подготовка для пересчета расписания подробно описывается в соответствующих разделах и в ряде случаев является довольно трудоемкой. Автоматизация этой подготовки возможна, но выходит за пределы данной книги.

Основой для всех дальнейших задач является приведенная в главе 5 задача о планировании для одиночной машины при последовательном выполнении работ. Эта задача рассматривается достаточно подробно, описываются возможности моделирования расписания при различных условиях, определяется понятие критического горизонта, приводятся примеры перепланирования расписания. В главах 6 и 7 рассматриваются еще две задачи для одиночных машин – для машины (печи) с параллельной обработкой и для планирования работы обрабатывающего центра с программным управлением.

В главе 8 приведены три задачи построения расписания для параллельных машин, в главе 9 – три задачи для гибких поточных линий, а в главе 10 – две задачи для универсального производства. Наконец, в главе 11 описана задача составления расписаний для производственных бригад. Во всех главах подробно описываются алгоритмы и программные листинги соответствующих задач. Каждая из двенадцати задач снабжена макросом на языке VBA Excel с открытым текстом. Исходные данные для каждой задачи записываются на листе Excel, и там же помещаются результаты планирования. Почти все задачи иллюстрируются с помощью диаграмм Ганта, а также различных других диаграмм.

В некоторых задачах в книге используется позаказное планирование, в других – планирование «на склад»; часть задач характерна для дискретного производства, другая – для процессного. Несмотря на столь широкий охват, для всех этих задач оказалось возможным применить общий подход с использованием упомянутых выше функций полезности.

Цель книги состоит в том, чтобы, во-первых, продемонстрировать возможности излагаемого метода, а, во-вторых, снабдить разработчиков производственных расписаний конкретными программными решениями, применимыми для большинства из промышленных отраслей. Необходимо учесть, что на практике весьма редко можно применить какую-нибудь задачу из описанных в этой книге непосредственно и без доработок. Как правило, на каждом предприятии (и даже в каждом цехе) есть свои отличия при составлении расписаний. Наличие открытых

текстов, пояснений в книге и многочисленных комментариев к программам, дает возможность сотрудникам предприятий самостоятельно доводить программы до практического использования. Более того, при необходимости такие доработки, а также переход к другим программным средствам, возможны с помощью автора и работающих вместе с ним специалистов.

Приведенные в книге решения, строго говоря, не являются оптимальными. Они являются только рациональными с точки зрения предложенных автором критериев. Вообще, при наличии нескольких одновременно действующих критериев, можно говорить только о Парето-оптимальных решениях на соответствующей компромиссной кривой (или поверхности). Однако, при составлении производственного расписания на конкретный период, у пользователя часто имеется только несколько расплывчатое представление об имеющихся у него приоритетах. Поэтому, с точки зрения автора, весьма важно суметь быстро построить возможное расписание, не противоречащее в целом представлениям пользователя. Конечно, в ряде случаев имеет смысл это расписание улучшить при помощи других методов (например, генетических), если существуют критерии для этой цели.

Выражаю свою благодарность С.В.Портному за помощь в разработке векторной графики в MS Excel.

## Базовые сведения о производственных расписаниях

1.1 Место производственных расписаний в процессе планировании .....	7	1.4 Критерии качества планирования .....	13
1.2 Масштаб и стратегия производства .....	9	1.5 Стандартная классификация оптимизационных моделей планирования .....	15
1.3 Календарно-плановые нормативы .....	11	1.6 Гибкое производство .....	17

### 1.1 Место производственных расписаний в процессе планировании

Широко известная схема на рис. 1.1 хорошо отражает основные задачи планирования в цепочках поставок и имеет вид т.н. матрицы «производственные процессы – временные горизонты».

Как следует из рис. 1.1, модули планирования должны обеспечить разработку заданий на перспективу, заданий средней срочности и краткосрочных расписаний для четырех производственных процессов – снабжения, производства, распределения и сбыта. Необходимо отметить разницу в понимании главного планирования в схеме на рис. 1.1 и общепринятого понятия



**Рис. 1.1** Модули планирования для матрицы цепочек поставок по [Stadtler, Kilger, 2008]

главного плана в ERP (Enterprise Resource Planning) – системах. Фактически под главным планированием на рис. 1.1 понимается разработка плана продаж и производства ERP-систем. Соответственно понятие производственного планирования на рис. 1.1 равносильно главному плану и номенклатурному плану в ERP-системе, а составление расписания – оперативному планированию.

Главный план представляет собой набор планово-учетных единиц, которые должны быть произведены в течение нескольких плановых периодов от начала действия этого плана до горизонта планирования. Плановый период, как правило, равен одному месяцу или, при больших масштабах производства, одной неделе. Горизонт составления главного плана (учет заказов) может устанавливаться в пределах 3 – 12 плановых периодов в зависимости от того, какое положение продукция предприятия занимает на рынке.

При формировании главного плана планово-учетные единицы (ПУЕ) могут быть представлены с различной степенью детализации. Существует определенная связь ПУЕ с типом производства и принятой на предприятии системой формирования объемно-календарных планов. Как указано в [Грачева и др., 2005], система оперативного планирования характеризуется видом планово-учетной единицы, составом календарно-плановых нормативов и порядком оформления плановой и учетной документации.

Из матрицы на рис. 1.1 непосредственно не следует, какие составляющие планирования должны быть выполнены в рамках ERP-системы, а какие возложены на APS (Advanced Planning System) – систему или какую-либо еще систему. Как правило, разработчики различных APS-систем выбирают из этой схемы некоторую часть, создают для нее программное обеспечение и согласуют его с базовой ERP-системой. При этом неизбежно, с одной стороны имеет место дублирование функций, а с другой – цели планирования могут не достигаться.

Оперативное (внутрицеховое) планирование, главным образом, заключается в составлении расписания выполнения заданий, установленных номенклатурным или главным планом. Иногда, например, при переналаживаемом крупносерийном процессном производстве, оперативный план совпадает с главным планом. В этом случае составление расписания является составной частью разработки главного плана. В настоящее время объемно-календарное планирование обычно осуществляется с помощью ERP-системы или комбинации ERP и APS систем. Для оперативного планирования возможно применение этих же систем или специальных MES (Manufacturing Execution System) – систем. Например, фирма SAP использует комбинацию ERP-системы R3 и APS-системы SAP APO как для объемно-календарного планирования, так и для составления внутрицеховых расписаний. Известны примеры совместного использования ERP-системы Альфа и MES-системы Фобос.

В системе Technoclass предусмотрена последовательная работа ERP и MES модулей соответственно для объемно-календарного и оперативного планирования (рис. 1.2). Как видно из рис. 1.2, APS-система в данном случае является составной частью MES модуля.

Цель этапа ежедневного планирования состоит в разработке автоматизированного ежедневного плана обработки изготавливаемых объектов в одном цехе или блоке цехов промышленного предприятия, работающих по директивно установленным срокам выпуска этих объектов. Этот этап планирования проводится внутрицеховыми службами или производственным отделом предприятия.

Заданиями для ежедневного планирования являются календарные план-графики, разрабатываемые производственным отделом для каждого производственного подразделения на период до горизонта планирования. Как правило, последний совпадает с величиной планово-учетного периода (неделя, декада, месяц).

Ежедневное плановое задание составляется в каждом цехе или блоке цехов в качестве документа, обязательного для выполнения конечными исполнителями. Задание может состав-

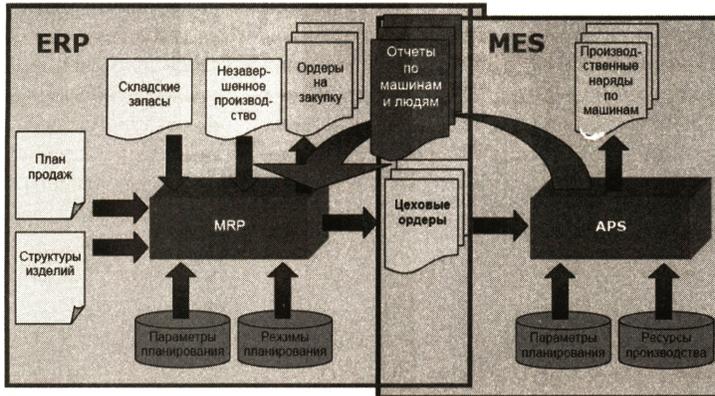


Рис. 1.2 Последовательное планирование ERP и MES модулей

ляться на любой календарный день, включая текущий день его составления. Моментом начала выполнения задания является начало первой рабочей смены планового дня, если этот день позже текущего дня составления задания. В случае, если плановый день совпадает с днем составления задания, моментом начала его выполнения считается момент его составления.

## 1.2 Масштаб и стратегия производства

Для построения модели планирования необходимо учитывать характерные особенности конкретного производства. Часто полагается, что планирование следует вести различными способами в зависимости от того, является производство дискретным или процессным. Напомним, что в дискретном производстве единицами продукции являются штуки, а в процессном – единицы массы или объема. Однако оба эти вида производства имеют существенное общее свойство, заключающееся в том, что во всех случаях конечный продукт отгружается потребителю в размере одной или нескольких партий продукции.

Если рассматривать процессное производство, то следует различать два его вида – периодическое производство и непрерывное производство. В периодическом процессном производстве все его стадии осуществляются последовательно в одном аппарате, в непрерывном – одновременно в разных аппаратах. Вместо термина «аппарат», характерного для процессного производства, в дальнейшем везде будем употреблять более общий термин «машина». При периодическом производстве, естественно, готовая продукция выгружается из машины по истечению периода обработки в виде некоторой партии. В процессном непрерывном производстве, несмотря на непрерывность самого процесса, отбор продукции также возможен только частями, которые также образуют партию. Поскольку основной задачей планирования является определение размеров партий и интервала между ними, использование «партионного» свойства продукции позволяет однотипно подойти к вопросам планирования как дискретного, так и процессного производства.

С точки зрения использования тех или иных методов планирования наиболее важными характеристиками производства являются его техническая структура (тип), масштаб и производственная стратегия.

Характер планирования сильно зависит от использования на производстве той или иной технической структуры, которая тесно связан с его масштабом (табл. 1.1).

Наиболее универсальным с точки зрения масштаба, является применение одной машины. Более сложные технические структуры тяготеют либо к большому, либо к малому масштабу производства. Промежуточным является случай не синхронизированного поточного производства (предметно-замкнутого участка), при котором характерный для массового производства поточный способ комбинируется с некоторыми возможностями универсального производства.

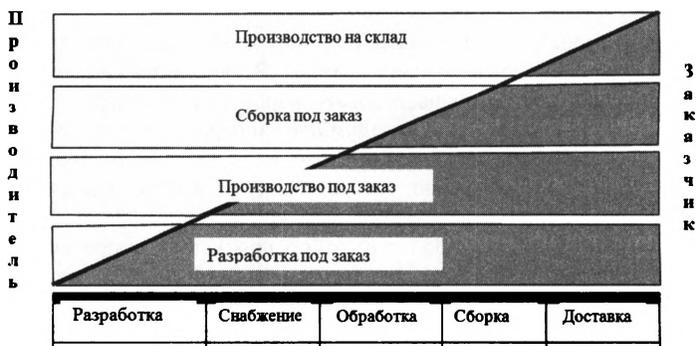
Стратегия производства характеризует степень готовности выпускаемой продукции к удовлетворению потребительского спроса. Эта степень готовности определяет скорость реагирования производственного предприятия на получаемые им заказы и очень существенно влияет на статус предприятия на рынке. Известны четыре стратегии производственной готовности:

- производство «на склад» (make-to-stock, MTS);
- производство «под заказ» (make-to-order, MTO);
- сборка «под заказ» (assemble-to-order, ATO);
- разработка «под заказ» (engineer-to-order, ETO).

На рис. 1.3 видно, как точка проникновения заказов (decoupling point), соответствующая границе серой области, перемещается в глубину производственной деятельности по мере приближения стратегии к отслеживанию внешних заказов. На выбор стратегии производства влияют длительность производственного цикла, допустимое время ожидания выполнения заказа в

**Таблица 1.1** Связь типа производства и его масштаба

Основные типы производства	Масштаб производства
Одиночная машина	Любой возможный
Несколько специализированных параллельных машин	Массовый, крупносерийный
Синхронизированное поточное производство	Массовый с модификациями или крупносерийный
Предметно-замкнутый участок	Серийный, мелкосерийный
Универсальное производство	Мелкосерийный и индивидуальный
Проектное производство	Индивидуальный



**Рис. 1.3** Глубина проникновения заказов для разных производственных стратегий

конкурентной среде, необходимость адаптации продукции к требованиям покупателя, наличие достаточных оборотных средств и т.д. Может показаться, что выбор стратегии производства жестко связан с его масштабом, однако это не всегда так. Стратегия «на склад» может использоваться даже при мелкосерийном производстве, если наблюдается достаточно постоянный спрос. Если в этом случае возможно варьирование состава продукции при заказе, то стратегия «на склад» видоизменяется в стратегию «сборка под заказ», при которой основная масса компонентов все же изготавливается «на склад». В то же время стратегия «под заказ» часто используется при крупносерийном производстве.

Тип модели планирования существенно зависит от способа организации производства – «выталкивание» (push) или «вытягивание» (pull). Как известно, при выталкивающем способе материальный поток перемещается от одного исполнителя к каждому последующему адресату строго по распоряжению (команде), поступающему из центра управления локальным (цех, участок) или общим (предприятие) производством. Вытягивающий способ производства, наоборот, предусматривает определение объемов продукции на каждом производственном этапе исключительно по потребностям последующих этапов.

### 1.3 Календарно-плановые нормативы

Основой проведения плановых расчетов являются текущие исходные данные о выпускаемой продукции, оборудовании и заказах. Кроме того, используются сведения нормативно-справочного характера, например, о режиме работы предприятия в целом и его отдельных подразделений. Результатом планирования являются некоторые расчетные данные.

Выше было указано, что система оперативного планирования, кроме вида планово-учетной единицы, характеризуется составом календарно-плановых нормативов. При автоматизированном планировании, однако, этот состав не является жестко фиксированным. Прежде всего, использование той или иной плановой величины в качестве нормативной или расчетной зависит от этапа планирования. Например, длительность производственного цикла для изделий конкретного вида при объемно-календарном планировании может считаться нормативно заданной величиной, а при оперативном планировании эта длительность определяется в процессе планирования.

Кроме того, система может автоматически менять использование расчетных нормативов по заложенным в систему правилам их приоритетов. Например, при наличии в базе данных норматива сменности конкретного цеха для расчетов используется эта величина, в противном случае для этого же цеха в качестве норматива сменности используется сменность по предприятию в целом.

При планировании могут использоваться различные календарно-плановые нормативы шести видов:

- нормативы, характеризующие работу предприятия в целом;
- нормативы, относящиеся к организационной группе (цеху);
- нормативы по группе оборудования;
- нормативы по каждому конструкторскому объекту;
- нормативы версии технологического процесса на объект в целом;
- нормативы на операции техпроцесса.

Весь набор нормативов предприятия в целом можно разделить на две группы. К первой из них относятся нормативы, описывающие характер работы предприятия как единого производственного организма. Использование этих нормативов не зависит от параметров структуры предприятия. Ниже приведен примерный перечень таких нормативов:

- размер планово-учетного периода предприятия (год, полугодие, квартал, месяц, декада, неделя, сутки);
- способ определения начала отсчета номеров партий запуска продукции (с начала производства, текущий год, квартал, месяц, декада, неделя, сутки);
- норматив времени на приобретение материалов и комплектующих изделий для обеспечения производственной программы в сутках;
- время на разработку лимитно-заборных карт в сутках;
- норматив времени на получение материалов со складов в часах;
- норматив времени на передачу цехам данных по календарному плану в часах.

Под планово-учетным периодом предприятия понимается период определения его финансово-экономических показателей, что, как правило, производится ежемесячно.

Выпуск готовой продукции и ее составляющих осуществляется партиями, причем обозначение каждой партии выпуска состоит из номера партии запуска и порядкового номера партии выпуска в соответствующей партии запуска – например, 132/2. Если партия запуска не дробится на партии выпуска, то обозначение партий запуска и выпуска совпадает. Таким образом, в обозначении партии готовой продукции и ее составных частей определяющее значение имеет порядковый номер партии запуска.

Такой порядок нумерации отражает тот факт, что для всех объектов в одной партии запуска соблюдается один и тот же технологический процесс. В то же время само значение порядкового номера партии запуска для любого объекта зависит от точки начала отсчета, которая может устанавливаться в зависимости от принятой на предприятии традиции.

К остальным нормативам первой группы по предприятию в целом относятся, в основном, показатели, регламентирующие затраты времени на передачу информации между подразделениями предприятия, а также усредненные данные по работе с поставщиками и клиентами.

Ко второй группе нормативов предприятия в целом можно отнести приведенные ниже нормативы, затрагивающие характер работы подразделений:

- количество рабочих смен;
- размер цехового планово-учетного периода (месяц, декада, неделя, сутки);
- продолжительность передачи партии с операции на операцию внутри цеха в часах с учетом среднего времени ожидания момента освобождения оборудования;
- продолжительность передачи партии между цехами в часах с учетом среднего времени ожидания момента освобождения оборудования;
- продолжительность передачи и возвращения партии предприятиям-смежникам для обработки в сутках.

Для каждого подразделения эти нормативы могут быть продублированы, и в таком случае будут обладать приоритетом перед нормативами, находящимися в общем списке предприятия. В то же время, для многих подразделений часто оказывается достаточным использования нормативов второй группы предприятия в качестве цеховых.

Основным нормативом, устанавливаемым для каждой единицы оборудования, является фонд рабочего времени. При отсутствии данных по каждому оборудованию может устанавливаться нормативный фонд времени на группу оборудования, находящегося в одном цехе. При этом под такой группой понимается перечень единиц оборудования, которые могут выполняться одинаковые технологические функции. Если данные по фонду времени для всех единиц оборудования имеются, то фонд времени для группы оборудования из норматива превращается в расчетную величину.

По каждому виду готовой продукции, а также каждому виду сборочной единицы или детали в процессе планирования могут использоваться несколько плановых нормативов. Например, для крупных деталей и сборочных единиц может устанавливаться как норматив наибольшее

количество объектов в партии. Для заготовок часто устанавливаются нормативные размеры заделов, а иногда и размеры партий – например, при определенном количестве мест для литья.

Кроме описанных выше категорий, для объекта номенклатуры могут быть наложены специальные ограничения по длительности изготовления партии, совмещению циклов изготовления и сборки и т.д., которые следует рассматривать как нормативные.

Например, для деталей с большой продолжительностью технологического цикла может устанавливаться нормативный коэффициент допустимой длительности производственного цикла. Этот коэффициент устанавливает наибольшее допустимое отношение длительности производственного цикла одной партии деталей к длительности производственного цикла партии готовой продукции.

Для каждого объекта номенклатуры должна иметься возможность до планирования установить значение нормативного коэффициента совмещения времени изготовления объекта со временем сборки вышестоящей сборочной единицы. Этот коэффициент может меняться в пределах от 0 до 1, и по умолчанию равен 0. На объекты номенклатуры могут устанавливаться такие нормативы, как размеры возможных потерь на брак. Возмещение брака может проводиться несколькими способами. В первом случае устанавливается параметр номенклатуры (детали) – плановый нормативный коэффициент потерь на брак от величины изготавливаемой партии. Если брак не планируется, его возмещение может предусматриваться из специально поддерживаемого нормативного страхового запаса (задела), величина которого также является параметром номенклатуры.

В том случае, если норматив страхового запаса на отдельно взятую номенклатуру деталей не устанавливается, он поддерживается автоматически по коэффициенту страхового запаса. Этот коэффициент определяет величину обязательного страхового запаса как процент от оптимальной партии и устанавливается для каждого цеха.

На операцию может устанавливаться норматив (параметр) количества одновременно обрабатываемых объектов на единице оборудования. Под этим параметром понимается, например, количество мест для деталей в камере сушки, в гальванической ванне, в окрасочной камере при одновременном выполнении операции над несколькими однородными объектами.

На операцию может устанавливаться нормативное количество работников, одновременно выполняющих операцию на единице оборудования. Это количество может быть меньше единицы при многостаночном обслуживании.

## 1.4 Критерии качества планирования

Для описания, анализа и оценки конфигурации цепи поставок была разработана модель SCOR (Supply Chain Operation Reference), устанавливающая основные понятия взаимоотношений между участниками цепи поставок. В целом модель SCOR базируется на трех основных идеях:

- моделирование бизнес-процессов;
- количественная оценка качества процессов;
- использование наилучших (эталонных) образцов.

Модель SCOR предусматривает 4 категории оценки качества каждой цепочки поставок:

- уровень обслуживания заказчиков;
- экономическая эффективность;
- гибкость в удовлетворении спроса;
- способность к развитию.

**Таблица 1.2** Основные критерии и ограничения

<b>Виды критериев и ограничений</b>	<b>Обозначение</b>	<b>Направления улучшения</b>
Уровень обслуживания заказчиков	C1	Минимальное запаздывание
Поддержание складских запасов	C2	Своевременное пополнение
Прямые издержки	K1	Минимизация трудоемкости
Эффективное использование сырья и материалов	K2	Оптимальный выход разных видов продукции, минимум отходов
Длительность производственного цикла	K3	Уменьшение средней длительности выполнения заказов
Производительность (загрузка оборудования)	K4	Поддержание оптимальной средней загрузки, минимальных колебаний и минимального количества перерывов
Динамика потребления сырья, материалов и компонентов	K5	Равномерность использования, уменьшение складских и межоперационных запасов
Экономия ресурсов, обеспечивающих производство	K6	Уменьшение расхода энергии, моторесурса оборудования и т.п.
Мощность производства	O1	Установка рационального значения
Баланс основной продукции, побочной продукции и сырья	O2	Определение правильных соотношений
Емкость хранилищ	O3	Обеспечение рациональных размеров

Одним из важнейших бизнес-процессов в SCOR является планирование, поддерживающее определенный баланс между спросом и предложением. В процессе планирования определяются необходимые действия по производству, закупкам и доставке разнообразных продуктов.

Состав календарного план-графика на период до горизонта планирования обычно полностью известен и непосредственно не предполагает каких-либо изменений. Поэтому главные критерии качества оперативного планирования должны относиться к одной из двух категорий – уровню обслуживания потребителей или экономической эффективности. В то же время, в процессе выполнения разработанного оперативного плана часто возникает необходимость в его корректировке из-за большого количества разнообразных факторов. Можно полагать, что критерии, основанные таких параметрах, как даты выполнения заказов и время завершения работы, обеспечивают возможность высокого уровня обслуживания, а остальные критерии в той или иной форме определяют экономическую эффективность производства.

Не претендуя на абсолютную полноту, приведем примерный перечень возможных критериев оптимизации и основных ограничений (табл. 1.2).

Первые 2 критерия в табл. 1.2 прямо или косвенно оценивают уровень обслуживания потребителей, 3 последних параметра являются ограничениями, остальные представляют собой различные факторы экономической эффективности. Кроме трех основных ограничений, приведенных в табл. 1.2, в конкретных задачах на математическую модель могут накладываться разнообразные дополнительные условия, связанные, например, с возможными размерами партий, их последовательностью, возможностью прерываний при обработке и т.п.

## 1.5 Стандартная классификация оптимизационных моделей планирования

В последние 2 десятилетия было опубликовано очень большое число работ, рассматривавших оптимизацию производственного планирования методами исследования операций. Например, в обзоре [Allahverdi et al., 2008], посвященном только работам, оптимизирующим планирование с переналадками, начиная с 2000 г., упоминается более 350 статей. Большую роль в упорядочении исследуемых задач сыграла классификация, предложенная в [Graham et al., 1979] и имеющая вид

$$\alpha|\beta|\gamma. \quad (1.1)$$

В этой классификации любые виды оборудования называются машинами (machine), а совокупность операций по производству партии какого-либо продукта называется работой (job). Поля классификации соответствуют трем направлениям:

- типу производства (виду используемых машин);
- типу проводимых работ и различных ограничений;
- виду целевой функции.

Использование этой классификации позволяет достаточно подробно описать основные характеристики практически каждой рассматриваемой задачи, хотя с усложнением этих задач в классификационных полях каждого из трёх направлений приходится записывать все больше различных параметров.

В первоначальном варианте классификации предполагалось рассматривать 5 типов производства.

- Одиночная машина (single machine). Этот тип не только используется для планирования работы одной имеющейся машины, но и считается базовым для разработки алгоритмов планирования в более сложных случаях.
- Параллельные машины (parallel machines), которые могут быть абсолютно одинаковы, подобны по своим параметрам, а также совершенно различны по параметрам, но применяться с одинаковой целью.
- Поточное производство (flowshop). В этом случае машины выстраиваются в порядке технологического процесса, а все работы на этих машинах – в одинаковой последовательности. При этом допускается, что операционное время для различных машин и различных работ также может быть различным.
- Универсальное производство (jobshop). При таком варианте производства для различных работ возможен любой порядок технологического процесса.
- Производство с не установленным порядком технологического процесса (openshop). Здесь различные операции каждой работы могут выполняться в любой последовательности.

В поле  $\alpha$  может также указываться количество машин для соответствующего типа производства.

Типы ограничений, записываемые в поле  $\beta$ , могут иметь самый разнообразный характер. Прежде всего, это ограничения различных типов, налагаемые на даты окончания и начала работ. Затем могут указываться обозначения ограничений по приоритетам работ, возможности их прерывания в процессе обработки, необходимости обработки партиями, характеру последовательности операций и т.д.

В качестве целевой функции, описываемой в поле  $\gamma$  стандартной классификации, часто используется один из показателей времени проведения задаваемого объема работ, приведенных ниже.

Наиболее известным является критерий, определяемый по полному времени завершения всего объема запланированных работ  $C_{max}$  (makespan). Величина  $C_{max}$  равна отрезку времени от начала работ (момента, равного нулю) по разработанному плану до момента окончания последней работы, указанной в этом плане. Очевидно, что

$$C_{max} = \max(C_i), \quad (1.2)$$

где  $C_i$  – момент завершения  $i$ -ой работы.

Критерий  $F_{max}$  определяет наибольшую длительность проведения  $i$ -ой работы, т.е. продолжительность производственного цикла

$$F_{max} = \max(F_i), \quad F_i = C_i - r_i, \quad (1.3)$$

где  $r_i$  (release date) – момент запуска  $i$ -ой работы.

Критерий  $T_{max}$  равен наибольшему запаздыванию окончания  $i$ -ой работы, т.е.

$$T_{max} = \max(T_i), \quad T_i = \max(0, C_i - d_i), \quad (1.4)$$

где  $d_i$  (due date) – момент окончания работы, заданный заказчиком.

Критерий  $L_{max}$  равен наибольшему отклонению  $i$ -ой работы от заданного срока, т.е.

$$L_{max} = \max(|L_i|), \quad L_i = C_i - d_i. \quad (1.5)$$

Существуют также различные другие критерии планирования и их комбинации, которые могут быть использованы в качестве целевой функции. Например, в качестве критерия может быть использована сумма по всем  $n$  работам

$$T^w = \sum_{i=1}^n w_i T_i \quad (1.6)$$

запаздываний каждой работы  $T_i$  с весом  $w_i$ .

Стоимостной критерий  $f$  может относиться либо к прибыли, либо к издержкам. В первом случае критерием является величина  $f_{max}$ , а во втором  $f_{min}$ . При использовании в качестве критерия взвешенной стоимости запаздываний определяется величина

$$f^w = \sum_{i=1}^n w_i T_i c_i, \quad (1.7)$$

где  $c_i$  – цена одного дня запаздывания.

## 1.6 Гибкое производство

Гибкое производство облегчает возможность оперировать различными изменениями в производственной ситуации. Такое производство должно обладать определенными специальными свойствами:

- объекты производства должны обладать четкой системой идентификации;
- производство должно легко управляться с помощью системы планирования и диспетчирования;
- должна быть хорошо организована переналадка производства.

Различают 7 разновидностей гибкости:

- операционная гибкость отдельной машины;
- гибкость выпуска различных модификаций продукции;
- возможность чередования выпуска различной продукции;
- способность к переходу на новую продукцию;
- гибкость технологического маршрута;
- гибкость выпускаемого объема продукции;
- гибкость в обслуживании готовой продукции.

Гибкость использования конкретной машины обуславливается значением времени переналадки, степенью сложности составления и ввода программы выполнения операций, и, в большой степени, квалификацией персонала. Значение имеют также конструктивные особенности машины, позволяющие выполнять различные операции с продукцией различных размеров и объемов.

Необходимость в выпуске различных модификаций продукции вызывается значительным разбросом потребностей различных заказчиков. Гибкость производства в данном случае, прежде всего, зависит от возможностей разработчиков продукции и организаторов подготовки производства, а также от вышеописанной операционной гибкости.

Чередование выпуска продукции различного вида существенно определяется размерами выпускаемых производственных партий. Размеры партий и порядок их запуска представляют собой основную задачу производственного планирования, и настоящая книга посвящена именно решению таких задач. Возможность перехода на новую продукцию обычно, прежде всего, оценивается с экономической точки зрения. Здесь учитываются такие факторы как возможность разработки продукции, наличие оборудования, трудности освоения, а также финансовые возможности.

Гибкость маршрутизации возможна, если существует достаточное количество оборудования, способного выполнять операции необходимого технологического процесса. Кроме того, такое оборудование должно быть оснащено соответствующим инструментом, материалами и т.п. Если используется цифровое оборудование, то оно также должно быть снабжено соответствующим программным обеспечением.

Изменение объемов выпуска продукции осуществляется, как правило, при изменении условий ее сбыта на рынке. Основными факторами при таких изменениях являются возможности оборудования, наличие персонала и финансовое состояние предприятия. Проблемой объема выпуска может явиться не только увеличение, но и снижение объемов, т.к. в этом случае необходимы специальные мероприятия с персоналом, а также с оборудованием.

После выпуска продукции предприятие часто сталкивается с необходимостью ее дальнейшего обслуживания. Гибкость в этом вопросе связана со стоимостью создания специальных станций и рабочих мест для обслуживания, подготовкой специального персонала, транспортными расходами, специальной аппаратурой и т.п.

Как правило, на одном предприятии невозможно одновременно достичь всех видов гибкости, и всегда существует проблема выбора наиболее важных ее аспектов. В случае достижения значительной гибкости скорость реагирования производства на внешние воздействия обычно существенно возрастает. В таких случаях можно говорить о т.н. «быстром» (agility) производстве.

## Ежедневное планирование

2.1 Групповые методы при составлении расписаний .....	19	2.4 Алгоритмы динамического планирования .....	27
2.2 Правила приоритета .....	21	2.5 Составление расписаний при нескольких критериях выбора .....	28
2.3 Динамические расписания .....	23		

### 2.1 Групповые методы при составлении расписаний

Для большинства видов производства основными проблемами оперативного управления являются:

- а) своевременное выполнение заказов;
- б) снижение продолжительности производственного цикла;
- в) снижение трудоемкости переналадки оборудования;
- г) снижение стоимости транспортировки материалов и заготовок;
- д) достаточная загрузка оборудования;
- е) равномерная загрузка персонала;
- ж) повышение коэффициента использования материала.

Рассмотрим эти вопросы более детально.

Часто полагают, что главная задача работы каждого цеха состоит в том, чтобы не сорвать заданные сроки поставки изготавливаемых объектов для последующей обработки и сборки. Действительно, контролирующий аппарат предприятия, как правило, нацелен на выявление запаздываний таких поставок, после чего часто следуют различные меры воздействия на исполнителей. В то же время изготовление ранее назначенного срока практически никогда не контролируется. Однако в этом случае изготовленные объекты обречены на длительное пролеживание в местах хранения, что приводит к омертвлению оборотных средств и захламлению цеховых площадей. Поэтому следует стремиться не просто к выполнению контрольных точек поставки, а к изготовлению заготовок, деталей и узлов в моменты, наиболее близкие к необходимым. Такой подход привел к появлению известной стратегии Just-in-Time, хорошо зарекомендовавшей себя в крупносерийном производстве.

Снижение продолжительности производственного цикла связано с уменьшением времени нахождения материальных запасов в процессе производства. Проблемы, перечисленные в п.п. в) и г) связаны со стремлением снизить трудоемкость подготовки изготовления и транспортировки. Большие значения этих величин приводят к увеличению продолжительности производства,

удлинению производственного цикла и соответствующему увеличению стоимости изготовления. Указанные трудоемкости затрачиваются на каждую технологическую или транспортную партию, поэтому снижение количества партий приводит к уменьшению этих затрат.

Во многих случаях, особенно при использовании нового дорогостоящего оборудования, менеджмент предприятия стремится плотнее загрузить такое оборудование, чтобы оправдать сделанные затраты. Конечно, никакое оборудование не может быть загружено на 100%, но такие попытки иногда наблюдаются. Более разумной является политика загрузки на достаточно высоком уровне (70-80%), при которой остаются промежутки времени на корректировку сменных заданий, а также на систематическое техническое обслуживание.

Большое влияние на качество работы цеха оказывает характер отношений между работниками в процессе производства. Необходимо учитывать естественные желания рабочих иметь высокий и стабильный заработок, равномерную загрузку в течение рабочей недели и рабочего дня, а также избегать усталости от длительной монотонной работы. К сожалению, при работе на рынке предприятие часто подвержено колебаниям спроса на выпускаемую продукцию, что неизбежно ведет к изменениям в потребности в рабочих и служащих.

Результатом деятельности любого производства являются не только продукция, но и отходы материала. Разумеется, количество таких отходов должно быть по возможности меньше, что может достигаться использованием, например, рациональных карт раскрыя. Однако при резких и частых изменениях в производственных планах, такие составленные заранее карты быстро становятся не актуальными.

Подводя итог изложенного выше, заметим, что большинство перечисленных проблем, а именно п.п. б), в), г), д), ж) сводятся к вопросам экономическим, т.е. к стоимости производственных затрат. Действительно, повышение трудоемкости в п.п. б), в), г) непосредственно вызывает необходимость в росте затрат на оплату труда; недостаточная загрузка оборудования по п.д) влечет затраты на компенсацию простоя (амортизационные расходы); появление отходов в п.ж) вызывает рост стоимости исходного материала. В то же время необходимость своевременного выполнения заказов по п.а) непосредственно к стоимости сведено быть не может. Любые попытки назначения т.н. «штрафов за просрочку» являются субъективными и, как правило, имеют мало общего с фактической действительностью.

Что касается п.е), то эта проблема носит социально-психологический характер, и также не может сводиться ни к экономическим, ни к каким-либо другим аспектам.

Переходя к рассмотрению путей решения описанных проблем, заметим, что своевременное выполнение заказов, обеспечивающее высокий уровень их выполнения (эффективности), может быть достигнуто, как правило, за счет уменьшения размеров партий, однако это противоречит требованию низкой стоимости производства. Необходимость одновременного улучшения этих характеристик представляет собой т.н. «дилемму планирования».

Поскольку улучшение показателей по стоимостным критериям практически всегда приводит к ухудшению критериев эффективности, получить единственное решение методами оптимизации, по большей части, невозможно. В таких условиях вычислительными методами возможно получить только набор т.н. недоминируемых (неулучшаемых, Паретовских) решений, а окончательное решение, т.е. выбор из предлагаемого набора, остается за пользователем. Для этих целей удобно использовать системы поддержки решения, позволяющие проводить моделирование расписаний при различных входных параметрах и выбирать вариант, наиболее подходящий в конкретных условиях.

Основным методом решения рассматриваемых задач является групповое планирование, заключающееся в определении рациональных размеров производственных партий и составлении соответствующих планов и производственных расписаний. Размеры партий и последовательность их выполнения существенно зависят от объемов и сроков выполнения внешних заказов.

Эта связь может быть кратко сформулирована так: изготовление продукции производится партиями, а отгрузка осуществляется по заказам.

Групповое планирование является естественным развитием идеологии групповых технологий в производстве. Групповая технология представляет собой производственно-организационную концепцию, которая позволяет использовать аналогии, существующие между конструктивными и технологическими особенностями разных объектов, для чего производится выявление похожих (или одинаковых) объектов с их последующим группированием. Подобные объекты объединяются в семейства, внутри каждого семейства объекты могут классифицироваться по различным признакам. На нижнем уровне деление семейства обязательно заканчивается типом объекта – совокупностью объектов одного семейства, имеющих в определённых производственных условиях очень близкие параметры технологических операций.

Групповая технология создает значительные возможности снижения времени и стоимости переналадки оборудования. Однако это не означает, что такая экономия всегда реализуется в действительности. Степень использования этих возможностей определяется совершенством применяемой системы оперативно-календарного планирования.

Попытки технологического группирования известны уже в течение 80 лет и в условиях стабильного производства часто приводили к успешным результатам. Однако последние десятилетия во всем мире характеризуются быстрыми изменениями во всех областях человеческой деятельности, в том числе, конечно, и производственной. Поэтому группирование производственных заданий в современных условиях может быть эффективным только, если оно осуществляется «on-line», т.е. непосредственно перед моментом начала производства.

Сегодня при каждом планировании на любом уровне имеет место новый набор заданий, и для технологического группирования необходимо иметь возможность быстро рассчитать соответствующий производственный план, что можно сделать благодаря появившейся доступности вычислительной техники. Наиболее просто плановое группирование объектов может проводиться по их типам, например по конструктивным обозначениям. В частности, при планировании производства нескольких партий деталей, обозначение которых отличается указанием на различные модификации, их целесообразно отнести к одному типу, и рассматривать целесообразность их группирования. Групповое планирование может осуществляться как на межцеховом, так и на внутрицеховом уровне. В настоящей книге мы ограничимся рассмотрением только внутрицехового уровня.

Для оценки степени группирования положим, что коэффициент группирования  $Kg_m$  на  $m$ -ой машине равен отношению количества работ  $n_m$  к количеству переналадок  $o_m$ .

$$Kg_m = \frac{n_m}{o_m}. \quad (2.1)$$

## 2.2 Правила приоритета

Оперативное (ежедневное) внутрицеховое планирование определяет размеры и сроки изготовления производственных партий, осуществляемых в соответствии с технологическими процессами. Заданиями для ежедневного планирования являются календарные план-графики, разрабатываемые производственным отделом для каждого производственного подразделения на планово-учетный период.

При ручном составлении очередного сменного задания плановик цеха обычно осуществляет последовательное прикрепление свободного оборудования к деталям, готовым к обработке

именно на этом оборудовании, руководствуясь при этом различными эвристическими алгоритмами, которые называются правилами приоритета. Правила приоритета формулируются исходя из рассмотрения очередности работ, выполняемых на одной машине.

Все правила приоритета можно разбить на 5 следующих групп.

- Простые правила, базирующиеся на информации, касающиеся конкретной работы – например, обязательной даты выпуска, трудоемкости, числе операций и т.п.
- Комбинация простых правил, в которой вся очередь работ делится на части, в каждой из которых действует свое простое правило.
- Взвешенные приоритеты, при которых простые правила используются для каждой работы с учетом ее весового индекса.
- Более сложные правила, использующие различные составные комбинации простых правил, а также изменения характеристик конкретных работ во времени.
- Другие правила, используемые в различных специфических условиях.

Перечислим наиболее известные простые и взвешенные правила.

FIFO (First In First Out) – классическое правило очереди, в которой раньше выполняется  $i$ -ая работа из очереди, которая появилась первой, т.е. момент запуска которой  $r_i$  является самым ранним.

LIFO (Last In First Out) – правило, при котором первой выполняется только что поступившая работа.

EDD (Earliest Due Date) – правило выполнения, в первую очередь, той работы, договорной срок выполнения  $d_i$  которой является ближайшим.

SPT (Shortest Processing Time) – правило наименьшей трудоемкости  $p_i$ .

LPT (Longest Processing Time) – правило наибольшей трудоемкости  $p_i$ .

WSPT (Weighted Shortest Processing Time) – правило взвешенной наименьшей трудоемкости. В этом случае работы выполняются в порядке уменьшения отношения  $w_i/p_i$  коэффициента приоритета  $w_i$   $i$ -ой работы к ее трудоемкости  $p_i$ .

MST (Minimum Slack Time) – правило наименьшей свободы планирования. Величина текущей свободы планирования для каждой  $i$ -ой работы в момент планирования  $t$  определяется как  $\max(d_i - p_i - t, 0)$ , т.е. текущая свобода планирования существует, если  $d_i - p_i - t \geq 0$  и отсутствует в противоположном случае.

CR (Critical Ratio) – правило критического отношения. Согласно этому правилу выполнение начинается с работы, для которой величина  $d_i - t/p_i$  минимальна. Аналогично предыдущему правилу, при  $d_i - t \leq 0$  величина CR считается равной 0.

Описанные выше правила, кроме двух последних, являются статическими, т.к. они непосредственно не зависят от момента времени, в котором осуществляется планирование. Последние два правила содержат значение текущего момента времени  $t$  и поэтому называются динамическими.

В качестве составного правила приоритета приведем наиболее известное правило «кажущейся стоимости запаздыванию» АТС (Apparent Tardiness Cost). Эта величина определяется по формуле

$$I_i(t) = \frac{w_i}{p_i} \exp\left(-\frac{\max(d_i - p_i - t, 0)}{k\bar{p}}\right), \quad (2.2)$$

где  $k$  – т.н. параметр масштаба,  $\bar{p}$  – средняя трудоёмкость для всего объема планируемых работ.

В зависимости от значения  $k$  правило работает либо ближе к правилу WSPT, либо к правилу MST.

Для правил приоритета справедливы следующие утверждения.

- Наименьшая средняя длительность производственного цикла  $\bar{F}$  достигается при использовании правила наименьшей трудоемкости SPT. При этом обеспечивается также наименьшее значение для максимальной длительности  $F_{max}$  каждой из всего набора выполняемых работ.
- Наименьшее значение для наибольшего отклонения  $i$ -ой работы от заданного срока  $L_{max}$  достигается при использовании правила EDD, при котором приоритет отдается работе с ближайшим договорным сроком выполнения  $d_i$ .
- Наименьшее среднее отклонение  $\bar{L}$  планового срока выполнения от договорного для всего набора работ получается при работе по правилу наименьшей трудоемкости SPT.
- Если все работы должны быть выполнены к одной назначенной дате, то наименьшее значение среднего запаздывания  $\bar{T}$  для всего набора работ получается при использовании правила SPT.
- Наименьшее значение для максимального запаздывания  $T_{max}$  каждой из всего набора работ достигается при работе с правилом EDD.

Для оценки количества запаздывающих работ применяется коэффициент запаздывания, равный отношению числа запаздывающих работ  $n_z$  к полному числу работ в задании  $n$ , т.е.

$$K_z = \frac{n_z}{n}. \quad (2.3)$$

Более подробно с правилами приоритета можно ознакомиться в книге [Мауэргауз, 2012]. Там даются примеры их использования.

## 2.3 Динамические расписания

Динамичность цехового планирования обуславливается всей совокупностью событий, происходящих в производственном подразделении за некоторый плановый период. Перечислим типы таких событий.

- Поступление планового задания с работами, включенными на период до установленного планового горизонта, и содержащего ожидаемые моменты поступления соответствующих заготовок и материалов.
- Фактическое поступление в цех материалов и заготовок, предусмотренных плановым заданием.
- Поступление материалов и заготовок на каждую машину для обработки.
- Окончание операции на каждой машине.
- Появление срочной работы, немедленно обеспеченной заготовками и материалами.
- Неожиданные события, связанные с поломками, отсутствием операторов, израсходованием материалов и т.п.

Среди всех этих событий, только само поступление планового задания и его данные являются детерминированными (четко определенными), тогда как остальные события либо являются случайными, либо имеют значительную случайную составляющую.

В целом, для динамического планирования используется один из двух возможных методов. В первом случае применяются методы, основанные на правилах приоритета последовательности выполнения работ. При втором методе используются различные алгоритмы, позволяющие строить расписание с помощью эвристических методов поиска решения.

Наличие планового задания позволяет плановикам цеха разработать производственный план, учитывая выполнение текущих работ и плановые сроки поступления заготовок и материалов для новых работ. Под плановым периодом  $G$  понимается количество рабочих дней, по

прошествии которых план регулярно пересчитывается. Такой пересчет обязательно проводится для учета накопившихся изменений в производственной обстановке даже в случае полного выполнения ранее составленного плана. В настоящей книге рекомендуется принимать плановый период в размере рабочей недели – обычно 5 рабочих дней.

Расписание составляется на период, ограниченный плановым горизонтом  $h$  в календарных часах. Плановый горизонт обычно равен или больше планового периода, причем в последнем случае часть составленного плана неизбежно подвергается корректировке. Корректировка также возможна в любой момент выполнения плана вследствие возникающих непредвиденных обстоятельств.

Динамическое расписание обязательно должно быть привязано к календарному графику работы цеха. При составлении расписания отсчет времени целесообразно вести, начиная от 0 часов первого дня выполнения расписания. Моментом начала выполнения расписания в настоящей книге полагается момент начала первого рабочего дня в формате 10.09.2016 8:00. Плановая служба цеха обычно работает в одну (первую) смену и, как правило, должна составить или откорректировать расписание для следующего рабочего дня.

Расчет расписания всегда ведется с некоторой точностью. В настоящей книге полагается, что вследствие неточностей исходных данных имеет смысл округлять временные параметры до величины 0,1 часа, т.е. 6 минут. Таким образом, величина в 6 минут является квантом (неделимой величиной) времени при составлении расписания.

Важным параметром динамического планирования является количество рабочих смен. Здесь полагается, что первая смена начинается в начале текущего рабочего дня, которое обычно равно 8 часов. Длительность рабочей смены может устанавливаться в зависимости от характера производственного процесса. Наиболее часто длительность смены равна 8 часов, но это не обязательно. В цехах с достаточно большой загрузкой обычно используется двухсменная работа с 8-часовыми сменами. При очень большой загрузке или, если процесс не допускает прерываний, в цехе осуществляется круглосуточная работа. В этом случае возможно использование трех смен по 8 часов, или двух смен по 12 часов, или еще какой-нибудь другой вариант.

Следует иметь в виду, что при круглосуточной работе, только первая смена всегда полностью относится к текущему календарному дню. При двухсменной работе с 8-часовыми сменами вторая смена также заканчивается до конца календарного дня. Однако при трехсменной работе с такими сменами, последняя смена текущего рабочего дня фактически имеет место в начале следующего календарного дня.

В некоторых случаях необходимо учитывать возможность изменения длительности отдельных смен. Например, в предвыходные или предпраздничные дни, последняя (или даже единственная) смена часто укорачивается, или вообще отменяется. В рабочий день, который следует после выходного дня, начало работы первой смены обычно совпадает с установленным моментом начала работы всего предприятия.

В течение каждой смены возможны перерывы в работе для приема пищи, физические паузы и т.п. Поскольку длительность таких перерывов сравнима с точностью исходных данных, то при планировании ими можно пренебречь.

Плановое количество цехового персонала  $N$  в каждую смену длительностью  $H$  может изменяться. Суточный фонд времени персонала для  $k$ -ого календарного дня  $F_{pk}$  для всех смен  $n$  рабочего дня равен

$$F_{pk} = \sum_{i=1}^n N_{ik} H_{ik}. \quad (2.4)$$

В этот же день машинный фонд времени цеха  $F_p$  по всем машинам  $M$  определяется по суточному рабочему времени  $E$  с учетом времени планового обслуживания машин

$$F_{mk} = E_k - \sum_{i=1}^M T_{ki}. \quad (2.5)$$

Отношение фонда времени персонала к машинному фонду времени назовем суточным коэффициентом обеспеченности персоналом  $K_s$ ,

$$K_{sk} = \frac{F_{pk}}{F_{mk}}. \quad (2.6)$$

Величина коэффициента  $K_s$  зависит от текущего рабочего дня и при планировании целесообразно определять среднее значение  $K_s$  на каждую рабочую неделю.

При параллельном использовании нескольких машин качество расписания существенно зависит от равномерности их загрузки. Коэффициент  $K_n$  неравномерности загрузки будем определять как отношение длительности выполнения расписания машины с наибольшей длительностью к машине с наименьшей длительностью

$$K_n = \frac{C_{max}}{C_{min}}. \quad (2.7)$$

На последовательность работ в расписании существенно влияет первоначальная настройка машин. Настройка может задаваться в исходных данных двумя способами: номером последней выполняемой работы либо ее видом. В описываемых программах в первом случае указывается ожидаемый процент выполнения работы на начало расписания, во втором случае – ожидаемый момент освобождения машины в календарных часах. Первый случай характерен для задач, выполнение которых может прерываться, второй – для задач, не допускающих прерывания.

Величина цеховой загрузки  $K_w$  в данной книге определяется по соотношению суммарной трудоемкости всех работ  $W$  и полного фонда времени  $F$  на горизонте планирования с учетом количества машин  $M$ . Горизонт планирования устанавливается по заказу с наибольшим резервом времени в рабочих часах. Коэффициент загрузки  $K_w$  равен

$$K_w = \frac{W}{FM}. \quad (2.8)$$

Расписание основывается на сроках поступления материалов и заготовок, указанных в плановом задании цеху. Составленное расписание можно рассматривать как дерево плановых событий, отражающих установленные начало и конец выполнения каждой операции. Процесс составления расписания в таком случае заключается в определении новой ветви после каждого произошедшего планового события.

Поскольку заготовки и материалы для новых работ должны поступать в различные моменты времени, производственное расписание невозможно сформировать, пользуясь в начальный момент планирования статическими правилами приоритета, описанными в предыдущем параграфе. Однако этими правилами, вообще говоря, можно пользоваться в каждый плановый момент поступления новой партии заготовок и материалов для новой работы, если использовать т.н. вычисляемые приоритеты [Фролов, 2010]. В этом случае планирование становится динамическим даже при использовании статических правил приоритета.

Примером использования правил приоритета для построения расписания является методология многокритериального моделирования гибких производственных систем, предложенная

в [Schnits et al., 2004]. Методология предусматривает два этапа выбора решения на каждом плановом событии. На первом этапе выбирается главный критерий качества расписания и соответствующие этому критерию правила приоритета. Выбор этого критерия производится, исходя из производственной обстановки на основе базы знаний, формирующейся самим пользователем по имеющемуся опыту. Во время второго этапа производится моделирование поведения системы в условиях принятого решения и оценка его качества.

В описываемом примере возможно использование двух критериев расписаний: критерия  $\bar{F}$  средней продолжительности производственного цикла и критерия  $\bar{T}$  среднего запаздывания окончания работы. Для определения выбора критерия для следующей ветви дерева решений, после каждого планового события используется алгоритм, приведенный ниже.

**ЕСЛИ** выполняется

$$\frac{1}{M} \sum_i^n p_i > \frac{K_1}{n} \sum_i^n (d_i - t) \quad \text{и} \quad \frac{1}{n} \sum_i^n TC_i > C_i, \quad (2.9)$$

**ТО**

критерием является величина  $\bar{T}$

**ИНАЧЕ**

**ЕСЛИ** существует

хоть одна работа с номером  $i$ , для которой

$$CR_i < K_2 \quad \text{или} \quad CR_i < 0, \quad (2.10)$$

**ТО**

**ЕСЛИ** выполняется

$$TC_i > C_2, \quad (2.11)$$

**ТО**

критерием является величина  $\bar{T}$ ;

**ИНАЧЕ**

критерием является величина  $\bar{F}$ ;

**ИНАЧЕ**

критерием является величина  $\bar{F}$ .

Здесь используются обозначения:  $p_i$  – трудоемкость  $i$ -ой работы;  $d_i$  – плановый момент выполнения  $i$ -ой работы;  $n$  – количество работ;  $M$  – количество машин;  $t$  – текущий момент времени;  $TC_i$  – стоимость запаздывания единицы времени  $i$ -ой работы;  $CR_i$  – критическое отношение  $i$ -ой работы, равное  $(d_i - t)/p_i$ ;  $K_1$  и  $K_2$  – коэффициенты, устанавливаемые в системе;  $C_1$  и  $C_2$  – стоимостные коэффициенты.

В первом из неравенств 2.9 сравнивается трудоемкость всей совокупности заказов, приходящая на одну машину, со средней величиной резерва времени  $d_i - t$ , умноженной на системный коэффициент  $K_1$ . Во втором неравенстве 2.9 проверяется соотношение между средней стоимостью единицы времени запаздывания и установленным стоимостным коэффициентом.

Если эта трудоемкость в левой части первого неравенства 2.9 больше среднего допустимого резерва времени, и кроме того стоимость запаздывания во втором неравенстве больше допустимой величины  $C_1$ , то критерием заведомо является величина среднего запаздывания  $\bar{T}$ .

Если хотя бы одно из условий 2.9 не выполняется, то возможен переход к использованию критерия длительности цикла  $\bar{F}$ . При этом все множество работ проверяется по значениям критического отношения  $CR_i$ .

Если критическое отношение для всех работ больше установленного системного коэффициента (это имеет место при значительном резерве времени для выполнения каждой из работ), то критерием заведомо является величина  $\bar{F}$ . Если для некоторых работ резерв времени недостаточен и, соответственно, критическое отношение меньше установленной системной величины, производится дополнительная проверка по значению стоимости запаздывания  $i$ -ой работы 2.11. При большой стоимости запаздывания выбирается критерий  $\bar{T}$ , а при малой – критерий  $\bar{F}$ .

Выбор критериев обуславливает выбор соответствующего правила приоритета работ. Действительно, согласно предыдущему параграфу, наименьшая средняя длительность производственного цикла  $\bar{F}$  достигается при использовании правила наименьшей трудоемкости SPT, а наименьшее значение для максимального запаздывания  $T_{max}$  каждой из всего набора работ достигается при работе с правилом EDD.

Использование описанной методологии существенно зависит от адекватного выбора констант  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $C_1$  и  $C_2$ . Эти величины должны устанавливаться для каждого подразделения с различной структурой, что является затруднительным.

Как указывалось выше, альтернативой использованию правил приоритетов, является применение эвристических алгоритмов поиска решения. Характер таких алгоритмов существенно зависит от вида решаемых задач, классификация которых приведена в п. 1.5.

## 2.4 Алгоритмы динамического планирования

Согласно классификации в п. 1.5. все задачи расписаний, прежде всего, разделяются по типу производства (технической структуре используемых машин). Наиболее простыми являются алгоритмы поиска решения для одиночной машины, поэтому в качестве примера приведем один из таких алгоритмов для работ, прибывающих в различное время и имеющих различное время доставки.

В данной задаче доставка производится немедленно после окончания обработки. Поскольку длительность доставки включается в период выполнения работ, то общая продолжительность выполнения работ определяется последним моментом доставки. В [Carlier, 1982] было предложено каждую рассматривать работу как состоящую из трех операций: поступление работы на машину; обработка на машине; доставка потребителю. Предполагается, что первая и третья из них обеспечиваются неограниченными ресурсами, а вторая требует определенной трудоемкости.

В таком случае каждая  $i$ -ая работа характеризуется тремя параметрами – моментом поступления  $\tau_i$ , трудоемкостью  $p_i$  и длительностью доставки  $q_i$ . Часто эти параметры называют «головой», «телом» и «хвостом» работы (head, body, tail, НВТ), а целевой функцией этой задачи является минимизация общей продолжительности  $C_{max}$ .

Для решения НВТ задачи был разработан эвристический алгоритм, который из нескольких возможных работ выбирает ту, которая обладает наибольшим «хвостом» (largest tail, LT). Рассмотрим работу LT алгоритма на примере, данные для которого приведены в табл. 2.1.

В момент времени  $t = 0$  доступны работы 1 и 4. Поскольку длительность доставки  $q_4$  больше, чем  $q_1$ , то первой по порядку на шаге 1 выбирается работа 4. К моменту окончания этой работы, равному 2, доступны работы 1 и 2. На следующем шаге 2 выбирается работа 2 с длительностью доставки, равной 12.

**Таблица 2.1** Исходные данные набора работ

Номер работы	1	2	3	4	5	6
Трудоемкость $p_i$	4	3	5	2	6	4
Ожидаемая дата поступления $r_i$	0	1	4	0	3	6
Длительность доставки $q_i$	9	12	15	16	10	11

Воспользуемся способом описания последовательности работ, предложенной в [Sule, 2008]. Для этого запишем параметры последовательности в строку, которой укажем момент начала работы, трудоемкость и момент окончания. При этом для каждой работы последовательно записывается дата начала, затем в скобках номер работы и ее трудоемкость. Дата окончания одной работы служит началом последующей.

Последовательность после второго шага имеет вид

0 (4/2) 2 (2/3) 5

К моменту 5 доступны еще не выполненные работы 1, 3, 5, причем наибольшая длительность доставки имеет место для работы 3. Продолжая выполнение алгоритма до включения в последовательность всех работ, получим последовательность (первая строчка) и моменты доставки (вторая строчка):

0 (4/2) 2 (2/3) 5 (3/5) 10 (6/4) 14 (5/6) 20 (1/4) 24  
 4 18 2 17 3 22 6 25 5 30 1 33

Величина общей длительности, получаемой в результате использования LT алгоритма равна

$$C_{max} = r_l + \sum_{n=1}^{n(k)} p_{i(n)} + q_k, \quad (2.12)$$

где  $l$  – номер работы, с которой начинается последовательность, а  $k$  – номер работы, которая называется критической,  $n$  – порядковый номер работы в последовательности. Критической является та работа, для которой момент доставки имеет наибольшее значение. В данном случае запуск начинается с работы 4, а наиболее поздняя доставка осуществляется для работы 1 и поэтому  $l = 4$ ,  $k = 1$ ,  $n(k) = 6$ .

Доказано, что в том случае, когда  $q_k \leq q_i$  для всех  $i$  в пределах от  $l$  до  $k$ , решение является оптимальным, т.е.  $C_{max}$  равно минимально возможному. В приведенном примере  $q_k = q_1 = 9 < q_i$  для любого  $i \neq 1$ , и соответственно, в данном случае получен оптимальный результат. Решение приведенной задачи для одной машины часто эффективно используется при расчете расписаний для набора различных машин.

## 2.5 Составление расписаний при нескольких критериях выбора

В постановке задач группового планирования, как задач с одним критерием, содержится внутреннее противоречие. Действительно, причиной появления групповых способов обработки является стремление найти рациональный компромисс между высоким уровнем выполнения заказов и низкой стоимостью производства. Высокий уровень сервиса может быть достигнут только своевременным их выполнением, однако это противоречит требованию низкой стоимости производства. Необходимость одновременного улучшения этих характеристик представляет собой т.н. «дилемму планирования» [Nyhuis and Wiendahl, 2009], решение которой в принципе не может быть получено в однокритериальной постановке.

В этих случаях могут использоваться два метода оптимизации – с помощью весовых коэффициентов и выбор на множестве Парето. В первом случае всю совокупность критериев можно представить в виде одного интегрального критерия

$$F = (\alpha_1 F_1 + \alpha_2 F_2 + \dots + \alpha_f F_f), \quad (2.13)$$

где  $\alpha_i$  – весовой коэффициент частного критерия  $F_i$ .

Для весовых коэффициентов вводится условие нормировки

$$\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_f = 1. \quad (2.14)$$

Поскольку физический смысл каждого частного критерия может быть различным, все частные критерии приводятся к безразмерному виду:

$$F_i(\%) = \frac{F_i - F_i^{min}}{F_i^{max} - F_i^{min}} \times 100\%. \quad (2.15)$$

Вычисление интегрального критерия по формуле 2.13 не составляет трудностей, однако назначение весовых коэффициентов методом экспертных оценок, как правило, вызывает серьезные затруднения.

Если при составлении расписания одновременно использовать несколько критериев, то каждое состояние системы с переменными  $x_1, x_2, \dots, x_m$  можно оценить при помощи набора значений целевых функций  $f(x)_1, f(x)_2, \dots, f(x)_f$  в этом состоянии.

Говорят, что решение  $f^1$  доминирует решение  $f^2$ , если значения всех целевых функции первого решения больше или равны значениям второго, причем хотя бы одно из значений целевых функций первого решения больше, чем у соответствующей функции второго решения. В рассмотренном случае решение  $f^B$  доминирует  $f^G$ , а решение  $f^C$  доминирует  $f^H$ . В то же время решение не доминируется никаким другим решением.

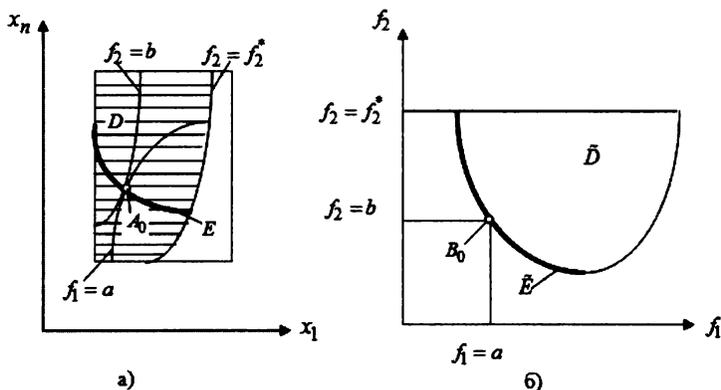
Множество недоминируемых решений называется множеством оптимальности по Парето или просто множеством Парето. Каждому недоминируемому решению  $f(x)$  в пространстве  $m$  переменных соответствует точка  $x$  с координатами  $(x_1, x_2, \dots, x_m)$ . Такие точки называются эффективными.

Для оптимального решения многокритериальных задач чрезвычайно важно определить эффективные точки в пространстве переменных и построить соответствующее множество Парето недоминируемых решений.

Наиболее частым и, в то же время легко иллюстрируемым графически, является случай двух целевых функций. Пусть количество независимых переменных равно  $n$ . Кривая  $E$  на рис. 2.1а представляет собой проекцию кривой эффективных точек в пространстве с размерностью  $n$  на плоскость некоторых двух переменных из общего числа  $n$ . Соответствующая кривая  $\tilde{E}$  на рис. 2.1б содержит множество Парето недоминируемых решений в пространстве критериев. Заштрихованная область  $D$  возможных значений на плоскости переменных  $x_1 x_n$  (рис. 2.1а) ограничивается некоторыми значениями  $x_1$  и  $x_n$ , а также кривой с заданным значением критерия  $f_2 = f_2^*$ .

Выберем на множестве (кривой) эффективных точек  $E$  какую-либо точку  $A_0$ . Каждая такая точка является одновременно точкой касания линий уровня критериев  $f_1$  и  $f_2$ , проходящих через эту точку.

На плоскости критериев (рис. 2.1б) область  $D$  отображается в область  $\tilde{D}$ , кривая  $E$  отображается в кривую  $\tilde{E}$ , точка  $A_0$  переходит в точку  $B_0$  с координатами  $a$  и  $b$ . Сама область



**Рис. 2.1** Эффективные точки в пространстве переменных и паретовские точки в пространстве критериев

$\bar{D}$  представляет собой область допустимых, но недостаточно эффективных решений, а граница этой области  $\bar{E}$  – множество эффективных решений.

Линия  $\bar{E}$  называется компромиссной кривой. Все точки компромиссной кривой представляют собой недоминируемые решения. При переходе от одной точки к другой точке этой кривой значение одного из критериев возрастает, а другого – обязательно убывает. Такой вид компромиссной кривой характерен для случая, когда желательно одновременное увеличение или одновременное уменьшение обоих критериев оптимальности. Если один из критериев должен увеличиваться, а другой уменьшаться, компромиссная кривая также существует, но имеет несколько другой вид, что будет показано ниже.

В отличие от компромиссной кривой, кривая  $E$  может иметь любой характер и даже превращаться в прямую линию. В качестве окончательного решения должна приниматься одна из точек компромиссной кривой, сочетание значений критериев в которой является наиболее приемлемым с точки зрения лица, принимающего решение.

## Построение многокритериальных динамических расписаний

3.1 Понятие производственной напряженности .....	31	3.4.2 Критерий относительных издержек .....	42
3.2 Функция текущей полезности заказа .....	34	3.4.3 Проверка требуемого момента запуска .....	42
3.3 Построение дерева расписания .....	37	3.4.4 Проверка полной длительности выполнения работ .....	43
3.4 Критерии отсечения ветвей .....	39	3.5 Типовой алгоритм построения расписания .....	44
3.4.1 Критерий функции средней полезности заказов .....	39	3.6 Вычисление интегралов напряженности заказов .....	47

### 3.1 Понятие производственной напряженности

При определении критериев оптимального плана, выполняемого конечными исполнителями, следует исходить не только, а, может быть, и не столько из технических или экономических факторов, сколько из соображений некоторых взаимоотношений между людьми, исполняющими этот план. Как указывается в книге [Афоничкин, Михайленко, 2009], существуют два основных направления принятия решений: рациональное и психологическое. В первом случае решение целиком опирается на математически рассчитанный результат; во втором – в значительной степени на интуицию и психологию сотрудников. Конкретный хорошо составленный производственный план должен являться некоторым компромиссом между пожеланиями всех участников производственного процесса.

В течение этого процесса между его отдельными участниками всегда образуется разветвленная сеть взаимоотношений, которую можно рассматривать как некоторое психологическое поле. Каждое поле, например магнитное или электрическое, имеет числовую характеристику, называемую напряженностью. Аналогично можно считать, что психологическое поле, возникающее в процессе производства, тоже может быть описано числовой величиной, которую назовем производственной напряженностью  $H$  [Мауэргауз, 1999]. В отличие, однако, от физических полей, напряженность психологического поля не может быть измерена физическим прибором и, соответственно, не может иметь физической размерности – т.е. должна быть безразмерной величиной.

Оценка безразмерной напряженности психологического поля (большая она или маленькая) может быть произведена только в сравнении с другим полем или с другим состоянием этого же поля – например, в другой момент времени. Возникает естественный вопрос о том, как вычислить возникающую производственную напряженность.

Для численного определения напряженности заметим, что оперативная обстановка в производственном подразделении характеризуется, в основном, двумя факторами: полным временем, необходимым для выполнения работ, и имеющимся запасом рабочего времени. Необходимо

отметить, что в предыдущей главе были описаны несколько т.н. динамических правил приоритета, которые учитывают эти два фактора. Это правило наименьшей свободы планирования MST, правило критического отношения CR, правило кажущейся стоимости запаздывании ATC.

Однако критерии, рассчитываемые по любому из этих правил, имеют серьезные недостатки. Прежде всего, их значения невозможно определить в том случае, когда обусловленный договором срок выполнения работы к моменту планирования уже истек. Самое главное, однако, состоит в том, использование этих критериев не позволяет определить степень загрузки оборудования и персонала от совокупного действия различных работ.

В отличие от приведенных выше динамических правил приоритета, вычислять производственные напряженности можно не только по каждой работе, но и по каждой единице оборудования и в целом по производственному подразделению. При этом напряженность по конкретной единице оборудования равна сумме напряженностей по тем работам, которые ждут обработку на этой единице оборудования, а напряженность по цеху в целом равна сумме напряженностей по всем работам или, что то же самое, по всем единицам оборудования.

Величина полного времени, необходимого для выполнения «спущенного сверху» планового задания складывается из двух величин – из трудоемкости изготовления и времени на передачу и переналадку работ с одной операции на последующую. Запас рабочего времени может быть как положительным, так и равным нулю, и отрицательным. Учитывая последнее, следует положить, что расчетные зависимости для определения напряженности должны быть разными при разных знаках запаса времени.

Поэтому положим для одной  $i$ -ой работы

$$H_i = \begin{cases} \frac{T_{1i} + T_{2i}}{z_{1i}} & \text{при } d_i - t \geq 0 \\ (T_{1i} + T_{2i}) \times z_{2i} & \text{при } d_i - t \leq 0, \end{cases} \quad (3.1)$$

где  $T_{1i}$  – продолжительность изготовления, определяемая трудоемкостью, не выполненной на момент планирования;  $T_{2i}$  – составляющая, возникающая из-за необходимости в передаче работы на остающиеся операции;  $z_{1i}$  – расчетный запас времени производства по отношению к плановому заданию;  $z_{2i}$  – расчетное отставание по времени от планового задания.

Величина  $T_{1i}$  может быть определена зависимостью

$$T_{1j} = \frac{1}{G} \sum_{j=k_i}^{N_i} \frac{p_{ij}(1 - \eta_{ij}/100)}{m_{ij}}, \quad (3.2)$$

где  $k_i$  – номер первой незаконченной  $j$ -ой операции для  $i$ -ой работы;  $N_i$  – полное количество операций для выполнения  $i$ -ой работы;  $p_{ij}$  – трудоемкость каждой оставшейся операции в часах или днях;  $\eta_{ij}$  – коэффициент готовности  $j$ -ой операции в процентах  $m_{ij}$  – количество одновременно обрабатываемых объектов  $i$ -ой работы во время  $j$ -й операции;  $G$  – количество часов или дней в плановом периоде.

Величина  $\eta_{ij}$  может быть отлична от 0 только при  $j = k_i$ , т.е. в процессе проведения первой незаконченной операции. Использование этого коэффициента позволяет при планировании учитывать напряженность работы, находящейся в процессе обработки. Если планируемая работа представляет собой изготовление партии деталей или сборочных единиц, то при планировании конкретной операции возможна одновременная обработка нескольких этих объектов, например, параллельно на нескольких машинах. Если при этом на каждой машине обрабатывается по одной детали, то величина  $m_{ij}$  равна количеству машин, параллельно выполняющих одну плановую работу. Знаменатель  $G$  введен в формулу 3.2 для того, чтобы составляющая  $H_{1i}$  стала безразмерной.

Величину  $T_{2i}$  определим зависимостью

$$T_{2i} = \frac{1}{G} \sum_{j=k_i}^{N_i} s_{ij}, \quad (3.3)$$

где  $s_{ij}$  – трудоемкость необходимой транспортировки и наладки оборудования при проведении  $j$ -ой операции для  $i$ -ой работы.

Для остающегося в распоряжении плановика безразмерного запаса времени можно положить

$$z_{1i} = \frac{d_i - t}{\alpha G} + 1, \quad (3.4)$$

где  $\alpha$  – коэффициент настройки для конкретного предприятия, отражающий степень «благодушия» при имеющихся запасах времени или «нервозности» при срыве сроков производства.

Наконец,

$$z_{2i} = \frac{t - d_i}{\alpha G} + 1. \quad (3.5)$$

Напряженность конкретной работы может включать соответствующий весовой коэффициент приоритета  $w_i$ , аналогично, например, описанным выше правилам WSPT или ATC. В частности, в наиболее простом случае, когда все коэффициенты готовности  $\eta_{ij} = 0$ , количество одновременно обрабатываемых объектов одной работы  $m_{ij} = 1$ , планирование ведется для первой операции и все  $k_i = 1$ , а трудоемкостью транспортировки и переналадки  $s_{ij}$  можно пренебрегать, напряженность можно определять по формулам

$$H_i = \begin{cases} \frac{w_i p_i}{G} \frac{1}{\frac{d_i - t}{\alpha G} + 1} & \text{при } d_i - t \geq 0 \\ \frac{w_i p_i}{G} \left( \frac{t - d_i}{\alpha G} + 1 \right) & \text{при } d_i - t \leq 0. \end{cases} \quad (3.6)$$

Рассмотрим зависимость напряженности от имеющегося запаса времени или отставания по срокам (рис. 3.1).

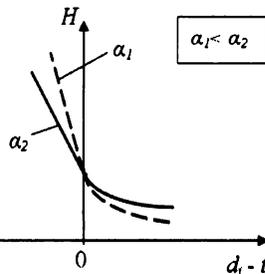


Рис. 3.1 Напряженность заказов

На рисунке 3.1 по оси абсцисс откладывается имеющийся запас времени – разница между заданной датой для каждой работы  $d_i$  и текущим моментом времени  $t$ . В положительной части диаграммы, т.е. при  $d_i > t$ , значения напряженности с ростом имеющегося запаса времени уменьшаются по гиперболическому закону. Если запас времени отрицателен, т.е. имеет место опоздание по сравнению с заданием  $d_i < t$ , то с нарастанием этого запаздывания напряженность растет по линейному закону.

В выражениях 3.4 и 3.5 при  $d_i = t$ , т.е. в точке перехода от одной зависимости к другой, значения  $z_1 = z_2 = 1$ . Соответственно совпадают и значения напряженности, вычисленные по обеим формулам. Более того, в этой точке совпадают значения производной  $dH/d(d_i - t)$ , вычисленные по обеим формулам. Поэтому прямая в левой части графика в точке перехода является касательной к гиперболе правой части графика в этой точке.

Производственная напряженность безразмерна и соответственно не имеет физического смысла. Однако она имеет т.н. психологический смысл. Действительно, рост этого параметра заказа вызывает усиление беспокойства по поводу его выполнения. На рисунке приведены две кривые изменения  $H$ , отличающиеся значением «психологического» коэффициента  $\alpha$ , причем  $\alpha_2 > \alpha_1$ . Очевидно, что чем больше коэффициент  $\alpha$ , тем более спокойно, с меньшей напряженностью, воспринимается запаздывание, но и меньше «расслабление» при наличии запаса времени.

### 3.2 Функция текущей полезности заказа

Возможность и желательность обеспечения высокого уровня обслуживания заказчиков можно оценить с помощью функций текущей полезности заказов  $V$ . Будем исходить из того, что наличие заказа в определенной перспективе весьма полезно для предприятия-производителя, причем эта полезность повышается, во-первых, с ростом объема заказа, а, во-вторых, с увеличением времени, предоставленным для подготовки заказа. Таким образом, возможность выполнения заказа в будущем имеет явную положительную полезность и должно принести соответствующий доход.

С другой стороны, с приближением договорного срока выполнения заказа предприятие практически всегда начинает испытывать определенные трудности самого различного характера. Величина полезности, очевидно, начинает падать, однако, если заказ удастся выполнить в срок, то до самого последнего момента эта полезность остается положительной, а в момент выполнения становится равной 0. В том случае, когда заказ в срок выполнить не удастся, предприятие-изготовитель, как правило, начинает получать неприятности различного характера. Соответственно, заказ начинает приносить убытки и полезность заказа для предприятия становится отрицательной.

Таким образом, при наличии резерва времени для выполнения заказа, предприятие-изготовитель обычно рассчитывает на получение прибыли, а при запаздывании с выполнением – как правило, несет убытки. Существует многочисленная литература, в которой описывается характер изменения полезности как функции возможного выигрыша или проигрыша, причем результаты этих исследований обычно можно свести к одному из двух вариантов, представленных на рис. 3.2.

По оси абсцисс на рис. 3.2 откладывается значение выигрыша (ожидаемой прибыли  $\Pi$ ), по оси ординат – полезность выигрыша в положительной области оси абсцисс или проигрыша – в отрицательной.

Кривая 3.2а была названа S-образной кривой после получивших большую известность исследований [Канемана и Тверского, 1984], заслуживших Нобелевскую премию по экономике за



Рис. 3.2 Возможные графики полезности прибылей и убытков

2002 г. В этих исследованиях было доказано, что в условиях вероятного возможного проигрыша (левая часть графика 3.2а) обычные люди склонны к риску.

Вогнутость левого участка кривой в этом случае говорит об отрицательной несклонности к риску – знак второй производной на этом участке кривой 3.2а положительный. В отличие от кривой 3.2а, для кривой на рис. 3.2б несклонность к риску остается положительной независимо от перспективы получить прибыль или убыток. Необходимо отметить, что график типа 3.2б или функция полезности [Grauson, 1960] была получена существенно раньше, чем график типа 3.2а. Отличия результатов, отражаемых кривыми 3.2а и 3.2б, были, по всей вероятности вызваны кругом опрашиваемых лиц и направлением применения денежных сумм. Если в исследованиях [Канемана и Тверского, 1984], как было сказано выше, опрашивались лица небольшого достатка, суммы фигурировали незначительные и их направлением было личное потребление, то в исследованиях [Grauson, 1960] речь шла об инвестициях, проводимых крупными компаниями.

Применим описанные выше результаты экономико-психологических исследований к построению функции текущей полезности заказов. Положим, что для  $i$ -ого заказа текущая полезность

$$V_i = \frac{w_i p_i}{G} - H_i, \tag{3.7}$$

где, как и раньше,  $p_j$  – остающаяся до окончания работы трудоемкость в сутках (часах);  $w_i$  – весовой коэффициент приоритета;  $G$  – фонд времени в сутках (часах) в течение планового периода;  $H_i$  – производственная напряженность заказа (работы).

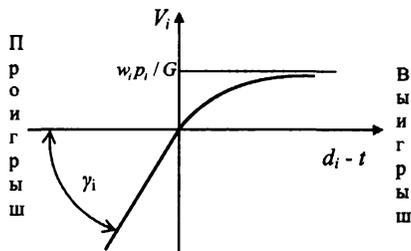


Рис. 3.3 Функция текущей полезности заказа

Рассмотрим зависимость функции текущей полезности от запаса времени до требуемого момента выполнения заказа (рис. 3.3), предполагая, что выполнение заказа еще не начато, т.е.  $p_j$  не зависит от времени.

Кривая на рис. 3.3 в положительной области  $d_i - t \geq 0$  стремится к асимптоте

$$V_i = \frac{w_i p_i}{G}. \quad (3.8)$$

В отрицательной области  $d_i - t \leq 0$  кривая превращается в прямую, для которой

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \gamma_i &= \frac{d \left( \frac{w_i p_i}{G} - H_i \right)}{d(d_i - t)} = - \frac{d H_i}{d(d_i - t)} \\ \text{или} & \\ \operatorname{tg} \gamma_i &= - \frac{d \left( \frac{w_i p_i}{G} \left( \frac{t - d_i}{\alpha G} + 1 \right) \right)}{d(d_i - t)} = \frac{w_i p_i}{\alpha G^2}. \end{aligned} \quad (3.9)$$

Сравнивая кривую на рис. 3.3 с кривыми на рис. 3.2, видим, что роль выигрыша или проигрыша на диаграмме 3.3 играет запас времени для выполнения работы. Наличие заказа в отдаленной перспективе представляется существенным выигрышем, но скорость роста этого выигрыша по мере отдаления падает. В этой области кривая функции полезности заказа ведет себя полностью аналогично обеим кривым на рис. 3.2.

Отрицательная область диаграммы 3.3 аналогична области проигрыша на рис. 3.2. В этой области кривые на рис. 3.2 имеют различный вид. Для установления правильности кривой на рис. 3.3 в отрицательной области будем исходить из описанного выше характера поведения людей. Поскольку функции текущей полезности используются менеджерами компаний, то их поведение скорее должно быть ближе к кривой на рис. 3.2б, а не к кривой 3.2а, т.к. вряд ли они будут иметь какую-либо склонность к риску даже в области проигрыша.

В то же время формальное использование для функции полезности заказов кривой 3.2б невозможно, т.к. наличие положительной несклонности к риску, характерное для этой кривой, приводит к резкому возрастанию отрицательной полезности и, соответственно, к ограничению по величине возможного проигрыша. Для функции полезности заказа такое ограничение существовать не должно, т.к., вообще говоря, возможно любое запаздывание выполнения заказа. Поэтому правильным является линейное падение функции текущей полезности заказа, при котором несклонность к риску (вторая производная функции) равна 0. Именно такая зависимость и имеет место на рис. 3.3.

Важнейшим свойством как напряженности, так и функции полезности, является свойство аддитивности, т.е. эти величины для разных заказов можно складывать. Например, полезность двух независимых заказов равна сумме полезностей каждого из них, поскольку эти полезности, как говорят математики, линейно независимы. Благодаря этому свойству можно рассчитывать среднюю полезность всей совокупности заказов за период.

Положим, что количество заказов на горизонте планирования равно  $n$ . Тогда их общая текущая полезность равна сумме полезностей каждого, т.к. заказы, как правило, независимы и суммарное значение функции текущей полезности заказов

$$V = \sum_{i=1}^n V_i = \frac{1}{G} \sum_{i=1}^n w_i p_i - \sum_{i=1}^n H_i. \quad (3.10)$$

Значение функции меняется со временем, т.к. изменяется запас времени до планового момента выполнения. Кроме того, часть заказов оказывается выполнена, а также появляются новые заказы.

### 3.3 Построение дерева расписания

Дерево решений – это схематическое представление проблемы принятия решений. Ветви дерева решений представляют собой различные события (решения), а его вершины – ключевые состояния, в которых возникает необходимость выбора. Чаще всего дерево решений является нисходящим, т. е. строится сверху вниз.

На рис. 3.4 показана схема построения дерева расписаний, на которой вершины (узлы) обозначены кругами, а ветви являются лучами, исходящими из узлов одного уровня и направленными к узлам следующего уровня. Узлы последнего уровня  $n$  называются листьями.

Каждая ветвь дерева расписаний отображает событие, состоящее из одной работы (или операции), производимой на конкретной машине. В полученном узле записываются соответствующие параметры системы: устанавливаемая оснастка; время выполнения; возможный объем работы и т.п.

Предположим, что количество работ, планируемых на горизонте  $h$  равно  $n$ , и каждая работа может быть выполнена на любой машине из множества  $M$ . Тогда количество возможных лучей, исходящих из корневого узла (уровень 1) равно

$$x_1 = Mn. \tag{3.11}$$

В общем случае, на следующем уровне, количество планируемых работ уменьшается на единицу и, соответственно

$$x_2 = x_1 M(n - 1). \tag{3.12}$$

Продолжая этот процесс, имеем на уровне  $k$

$$x_k = x_{k-1} M[n - (k - 1)] = x_{k-1} Mn \left[ 1 - \frac{k - 1}{n} \right]. \tag{3.13}$$

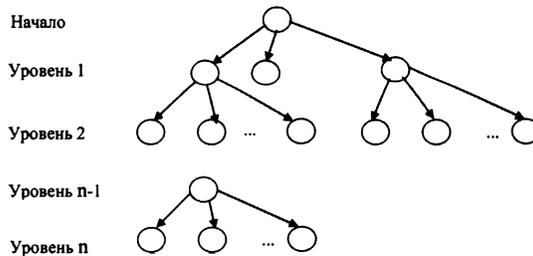


Рис. 3.4 Дерево расписаний

Зависимость 3.13 является геометрической прогрессией с переменным знаменателем. Отличие от обычной геометрической прогрессии с постоянным знаменателем заключается в наличии множителя  $1 - (k - 1)/n$ , зависящего от номера члена  $k$  геометрической прогрессии. Используя выражения 3.11 - 3.13, для  $k$ -ого члена прогрессии имеем выражение

$$x_k = (Mn)^k \prod_{i=0}^{k-1} \left(1 - \frac{i}{n}\right). \quad (3.14)$$

Согласно 3.14, количество узлов с возрастанием номера уровня  $k$  сначала быстро нарастает, но затем с некоторого момента из-за наличия множителя типа  $\prod_{i=0}^{k-1} (1 - i/n)$  начинает падать. На рис. 3.5 приведена зависимость этого множителя от уровня  $k$  при количестве работ  $n = 15$ .

Определим, на каком уровне имеет место максимум количества узлов дерева. Для этого прологарифмируем выражение 3.14:

$$\ln(x_k) = k \ln(Mn) + \ln\left(1 - \frac{1}{n}\right) + \ln\left(1 - \frac{2}{n}\right) + \dots + \ln\left(1 - \frac{k-1}{n}\right). \quad (3.15)$$

Поскольку логарифм некоторой переменной является монотонной (возрастающей) функцией этой переменной, то условие максимум значения этой переменной происходит в той же точке, что и максимум ее логарифма. Возьмем производную от выражения 3.15 и приравняем ее к нулю.

$$\frac{d(\ln(x_k))}{dk} = \ln(Mn) - \frac{k_{max}/n}{1 - (k_{max} - 1)/n} = 0. \quad (3.16)$$

Из 3.16 получим значение уровня, на котором имеет место наибольшее количество узлов дерева

$$k_{max} = \frac{n + 1}{1 + 1/\ln(Mn)}. \quad (3.17)$$

Например, при  $n=15$  и  $M=4$  максимум количества узлов имеет место при номере уровня, равном 13 и, соответственно формуле 3.14, примерно равен  $10^{19}$ .

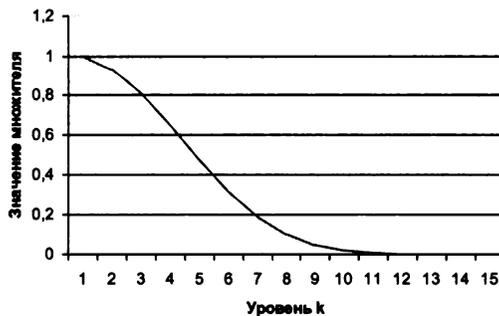


Рис. 3.5 Значение множителя в знаменателе прогрессии с ростом уровня

### 3.4 Критерии отсечения ветвей

Из приведенного выше примера, очевидно, что количество узлов дерева с увеличением числа заказов и машин быстро нарастает, что делает невозможный простой перебор вариантов. Некоторое уменьшение количества ветвей дерева можно получить, если рассматривать не все планируемые заказы, а только те из них, которые доступны к моменту текущего планирования. Однако в таком случае, в большой степени, теряется возможность группирования однотипных заказов, что нецелесообразно.

Для решения проблемы быстро растущего числа узлов здесь применяется отсечение ветвей (pruning) дерева по совокупности нескольких одновременно действующих критериев.

#### 3.4.1 Критерий функции средней полезности заказов

Первым таким критерием является функция средней полезности заказов  $\bar{V}$ .

Пусть в момент времени  $C_l$  заканчивается работа в узле дерева возможных вариантов расписаний, находящемся на уровне  $l$ . Если на уровне  $l + 1$   $k$ -я работа начинается на машине  $m$  в момент  $t_k$ , который больше или равен  $C_l$ , и эта работа длится без перерывов, то средняя полезность всего имеющегося набора работ  $J$  за все время от начала работ до окончания выполнения  $k$ -й работы в момент  $t_k + p_k$  в узле на уровне  $l + 1$  определяется как

$$\bar{V}_{l+1,k} = \frac{1}{t_k + p_k} \int_0^{t_k + p_k} V dt = \frac{1}{t_k + p_k} \left( \bar{V}_l \times C_l + \int_{C_l}^{t_k + p_k} V_k dt \right). \quad (3.18)$$

В выражении 3.18 величина  $\bar{V}_l$  равна средней полезности всего объема планируемых работ за время от начального момента  $t = 0$  до момента окончания последней уже запланированной работы  $C_l$ . Например, в начальный момент  $t = 0$  машина свободна, количество выполненных работ  $l = 0$  и, соответственно  $C_0 = 0$ . Величина  $t_k$  определяется моментом  $C_l$  или моментом поступления  $k$ -й работы.

Если в течение выполнения  $k$ -й работы возможны перерывы суммарной продолжительностью  $b_k$ , то момент окончания этой работы

$$F_k = t_k + p_k + b_k, \quad (3.19)$$

и зависимость 3.18 примет вид

$$\bar{V}_{l+1,k} = \frac{1}{F_k} \int_0^{F_k} V dt = \frac{1}{F_k} \left( \bar{V}_l \times C_l + \int_{C_l}^{F_k} V_k dt \right). \quad (3.20)$$

Интеграл в 3.20 согласно 3.7 равен

$$\int_{C_l}^{F_k} V_k dt = \frac{1}{G} \int_{C_l}^{F_k} \sum_{i \in J - I_l} w_i p_i dt - \int_{C_l}^{F_k} \sum_{i \in J - I_l} H_i dt, \quad (3.21)$$

где  $I_l$  – множество работ, выполняемых по плану до момента  $t_k$ .

Обозначим составляющую первого интеграла в правой части 3.21 от  $i$ -ой работы как  $\gamma_i^k$ . Имеем для любой работы, которая в момент  $t_k$  не начинается:

$$\gamma_i^k = \frac{w_i}{G} \int_{C_i}^{F_k} p_i dt = w_i p_i \frac{F_k - C_i}{G} \quad \text{для } p_i \neq p_k. \quad (3.22)$$

Для работы, начинающейся в момент  $t_k$ , остающаяся трудоемкость линейно падает во время выполнения. Допустим, что в течение работы возможен один перерыв, причем он происходит после выполнения половины всей работы. Тогда

$$\gamma_k^i = \frac{w_k}{G} \left[ \int_{C_i}^{t_k} p_k dt + \int_{t_k}^{t_k+p_k/2} (p_k - (t - t_k)) dt + \right. \\ \left. + \int_{t_k+p_k/2}^{F_k-p_k/2} p_k dt + \int_{F_k-p_k/2}^{F_k} (p_k/2 - (t - (F_k - p_k/2))) dt \right]. \quad (3.23)$$

После выполнения интегрирования получаем

$$\gamma_k^i = w_k p_k \frac{F_k - p_k/2 - C_i}{G} \quad \text{для } p_i = p_k. \quad (3.24)$$

Второй интеграл в правой части 3.21 представляет собой сумму определенных интегралов от напряженности, определяемой зависимостями 3.6. Формулы для различных случаев вычисления этих интегралов приведены ниже. По этим выражениям и зависимостям 3.22 и 3.24 определяется значение критерия  $\bar{V}$  в 3.20, которое может служить оценкой эффективности расписания в момент окончания каждой планируемой работы.

Если параллельно для одной и той же совокупности работ используются  $M$  машин, то количество возможных последовательностей в начальном корне возрастает в  $M$  раз и соответственно резко возрастает количество последующих узлов на всех уровнях построения дерева. Более того, выражение 3.18 в некоторых вариантах последовательностей становится несправедливым.

Очевидно, что в тех случаях, когда работы для двух последовательных уровней дерева относятся к одной машине, формула 3.18 справедлива. Однако, если машины для различных уровней различны, то возникает вопрос об определении средней полезности в таких случаях.

Выражение 3.18 представляет собой рекуррентную формулу для вычисления полезности на последующем уровне, если эта величина известна на предыдущем уровне. Обратим внимание, что в формуле 3.18 обе составляющие делятся на величину  $t_k + p_k$ , которая соответствует наибольшей длительности процесса на всех запланированных уровнях.

На рис. 3.6 приведены различные возможные сочетания продолжительностей работ  $t$  для уровней построения дерева 1 и 2. Предполагается, что в одном из узлов первого уровня выполняется работа  $J_1$  на машине  $M_1$ , а в другом узле первого уровня та же работа  $J_1$ , но на машине  $M_2$ . Поскольку машина  $M_2$ , например, имеет меньшую производительность, чем машина  $M_1$ , то длительность  $t$  в узлах первого уровня в вариантах б), г) больше, чем в узлах первого уровня для вариантов а), в).

Рассмотрим теперь возможные варианты соотношения длительностей выполнения работ на первом и втором уровнях. Это соотношение зависит не только от производительности машин на разных уровнях, но и от физического объема работ выполняемых на разных уровнях. В случае варианта б) объем работы  $J_2$  сравним с объемом  $J_1$ , и, т.к. производительность машины  $M_1$  выше, чем машины  $M_2$ , то длительность выполнения работы на уровне 2 меньше, чем на

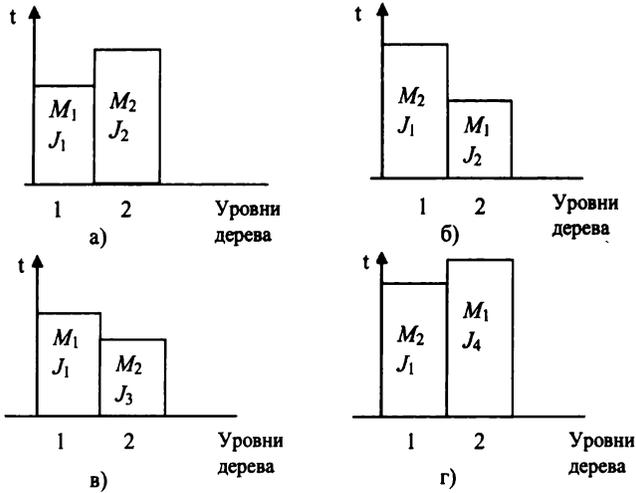


Рис. 3.6 Возможные варианты последовательностей в узлах дерева

уровне 1. На рис. в) показан случай, когда объем работы  $J_3$  гораздо меньше, чем для работы  $J_1$ , а на рис. г) обратный случай, когда работа  $J_4$  существенно больше, чем  $J_1$ .

Из рис. 3.6 следует, что работа на уровне 2 может быть выполнена либо позже, чем работа на уровне 1, что соответствует вариантам а), г), либо раньше нее, как показано в вариантах б), в). Первый случай вполне аналогичен работе на одиночной машине, на которой работы выполняются последовательно. Поэтому, можно предположить, что при окончании последующей работы позже, чем предыдущая, формула 3.18 справедлива. Более сложная ситуация имеет место, если работа последующего уровня выполняется раньше работы предыдущего уровня (рис. 3.7).

На рис. 3.7 приведена схема выполнения нескольких работ на двух параллельных машинах. Пусть при последовательном построении дерева выполнения работ на первом уровне  $S_1$  выполняется работа  $J_2$  на машине 1; на втором уровне  $S_2$  – работа  $J_5$  на машине 2 и т.д. На графике загрузки машины 1 показан зазор между работами  $J_3$  и  $J_2$ , возникший вследствие позднего поступления работы  $J_3$ . Положим, что последней запланированной работой является работа  $J_r$  на уровне  $S_l$  и эта работа должна выполняться на машине 1. Обозначим момент времени окончания работы машины 1 на уровне  $S_l$  через  $1l$ .

Рассмотрим случай, когда на последующем уровне  $S_{l+1}$  и на другой машине (в данном случае на машине 2) может выполняться некоторая работа  $J_k$ . Ранее последней на машине 2 была запланирована работа  $J_g$  на уровне  $S_q$  с моментом выполнения  $2q$ . В общем случае работа  $J_k$  может поступить позже этого момента, и началом ее выполнения будет являться момент  $t_k$ . Положим, что окончание работы  $J_k$  происходит раньше момента окончания работы на предыдущем уровне, т.е.  $t_k + p_k < C_{1l}$ , как показано на рис. 3.7.

В этом случае для определения средней полезности заказов можно предложить зависимость, аналогичную 3.18, а именно:

$$\bar{V}_{l+1,k} = \bar{V}_l + \frac{1}{t_k + p_k} \int_{C_m}^{t_k + p_k} V_k dt. \quad (3.25)$$

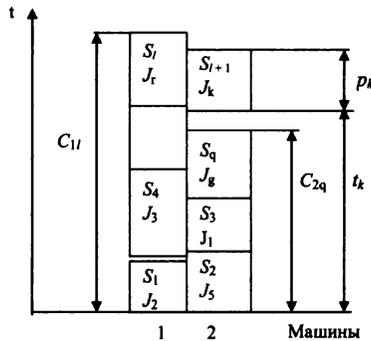


Рис. 3.7 Уровни выполнения работ для двух параллельных машин

Нижний предел  $C_m$  в интеграле 3.25 представляет собой момент окончания последней операции на машине  $m$ , требующейся для  $k$ -ой работы, выполняемой на уровне  $l + 1$ .

Если в течение выполнения  $k$ -ой работы возможны перерывы, то с их учетом выражение 3.25 имеет вид

$$\bar{V}_{l+1,k} = V_l + \frac{1}{F_k} \int_{C_m}^{F_k} V_k dt. \quad (3.26)$$

### 3.4.2 Критерий относительных издержек

Величина относительных издержек на переналадку на уровне  $l + 1$  до окончания выполнения  $k$ -й работы на машине  $m$  может определяться как сумма издержек переналадок, включая все ранее выполненные работы, т.е.

$$U_{l+1,k} = \frac{c_s}{c} \left( \sum_{j=1}^l s_j + s_{km} \right), \quad (3.27)$$

где:  $c$  – стоимость рабочей смены;  $c_s$  – стоимость часа переналадки;  $s_j$  – трудоемкость наладки на каждую работу в цепочке для узла дерева, включающего уровень  $l$ ;  $s_{km}$  – трудоемкость наладки на  $k$ -ю работу на машине  $m$ . Величина  $s_{km}$  в общем случае зависит от типа последней операции, выполненной на машине  $m$  до начала  $k$ -ой работы.

Результаты многочисленных расчетов функций полезности по формулам 3.27, 3.20 и 3.26 показали, что, программы, использующие эти выражения, хорошо группируют однотипные работы и, в основном, правильно определяют последовательность работ для достижения их своевременного выполнения.

### 3.4.3 Проверка требуемого момента запуска

Значение средней функции полезности  $\bar{V}$  прямо зависит от интервала времени между планируемым моментом запуска работы и необходимым моментом запуска  $g_i$ . Необходимый для выполнения плана поставок момент запуска  $g_i$  определяется как

$$g_i = d_i - p_i + 1, \quad (3.28)$$

т.к. момент выполнения определяется по окончанию временного интервала (рабочего дня, часа и т.п.) а момент запуска – по началу интервала.

Действительно, в соответствии с 3.18, величина  $\bar{V}$  зависит от интеграла напряженности за время выполнения работы  $p_k$ . Для этой работы, если соблюдается условие

$$d_k - C_l - p_k \geq 0, \quad (3.29)$$

т.е. требуемая дата выполнения больше, чем сумма даты окончания предыдущей работы  $C_l$  и трудоемкости планируемой работы  $p_k$ , то, используя первую из формул 3.6 и выражение 3.28, получим интеграл напряженности в виде

$$\int_{C_l}^{C_l+p_k} H_k dt = \alpha w_k \left[ p_k - (g_k - C_l + 1 + \alpha G) \ln \left( \frac{(d_k - C_l)/\alpha G + 1}{(g_k - C_l + 1)/\alpha G + 1} \right) \right]. \quad (3.30)$$

Введем переменную  $x = g_k - C_l$ , представляющую собой интервал времени между требуемым моментом запуска и моментом окончания предыдущей работы. Если, как предполагалось, соблюдается условие 3.29, то  $x > 0$ . Допустим, что величина  $(x + 1)/\alpha G \gg 1$ , обозначим  $a = 1 + \alpha G$  и  $b = (d_k - C_l)/\alpha G + 1$ . Тогда

$$\int_{C_l}^{C_l+p_k} H_k dt = \alpha w_k [p_k - (x + a) \ln(b)], \quad (3.31)$$

откуда видно, что интеграл напряженности линейно уменьшается с ростом  $x$ . Из этого следует, что, чем раньше происходит планируемый запуск по отношению к значению требуемого момента запуска  $g_i$ , тем, согласно 3.18, выше величина  $\bar{V}$ . Аналогичный результат можно получить и для случаев, когда  $d_k - C_l - p_k < 0$ .

Полученный результат показывает, что для повышения полезности составляющей  $\bar{V}$  от каждой работы следует стремиться к уменьшению интервала времени между требуемым моментом запуска и его фактически возможным значением. Для случаев, когда приоритет работ одинаков, логично допустить, что наилучшей возможностью добиться минимизации этих интервалов является запуск работ в порядке возрастания требуемого момента запуска  $g_i$ .

Отсюда следует, что при проведении отсечения ветвей необходимо учитывать величину требуемого момента запуска каждой работы  $g_i$ . Если работа проводится с перерывами, величина требуемого момента запуска отсчитывается по необходимому моменту выполнения работы в рабочих часах.

### 3.4.4 Проверка полной длительности выполнения работ

Использование возможности группирования однотипных заказов, прибывающих а различные моменты времени, приводит к появлению узлов, в которых длительность  $i$ -ого процесса намного превышает его наименьшую возможную длительность  $C(i)$  на этом уровне  $C_{min}$ . Поэтому имеет смысл на каждом уровне ограничивать рассмотрение теми узлами, для которых, для которых справедливо неравенство

$$C(i) \leq KC_{min}, \quad (3.32)$$

причем коэффициент возможного диапазона длительности  $K$  определяется зависимостью

$$K = 1 + \alpha e^{-b(\sqrt{Mn}-c)l}. \quad (3.33)$$

В формуле 3.33, как и выше,  $l$  – уровень построения дерева; количество работ равно  $n$ , количество машин –  $M$ ;  $a, b, c$  – постоянные коэффициенты. Значения коэффициентов  $a, b, c$  устанавливаются при рассмотрении конкретной задачи планирования.

### 3.5 Типовой алгоритм построения расписания

Отсечение излишних ветвей на каждом уровне построения дерева позволяет на следующем уровне использовать только остающиеся узлы, из которых производится дальнейшее ветвление. На рис. 3.8 приведена блок-схема типового алгоритма поиска возможных решений.

Из рис. 3.8 видно, что блок-схема может быть поделена условно поделена на несколько частей: ввод исходных данных и массивов (блок 1); цикл по уровням (блок 2); вложенные циклы внутри каждого уровня (блоки 3-7); расчет критериев (блок 8); выделение недоминируемых узлов (блоки 9-10); окончание расчета (блок 11). Кроме того, в программу могут дополнительно включаться блоки формирования групп совместно выполняемых работ, механизмы визуализации и построения графиков, функции пересчета расписания, блоки моделирования и т.п.

На каждом следующем уровне отбираются несколько вариантов возможных решений, не доминирующих друг друга, используя следующий алгоритм.

#### Шаг 1. Расчет функций полезности в начальный момент планирования

Определяются начальные состояния машин и объектов в процессе обработки.

Положим номер уровня  $l = 0$ ; начальная функция издержек  $U_0 = 0$ ; начальная полезность заказов  $V_0$  определяются по формуле 3.7; количество узлов  $Z_0 = 1$ .

ЦИКЛ по уровням

ЦИКЛ по узлам уровня

#### Шаг 2. Определение возможных работ в узлах уровня

Для каждого узла  $z$  построенного дерева на уровне  $l$  устанавливаются возможные работы  $i$  и определяются значения  $g_{zi}$  при помощи формулы 3.28.

ЦИКЛ по работам в узле

#### Шаг 3. Определение необходимой машины для работы в узле

Для каждой  $k$ -ой работы, которая возможна к моменту  $C_{lz}$ , и не является выполненной ранее, определяется необходимое семейство машин  $m$ .

ЦИКЛ по машинам для каждой работы

#### Шаг 4. Расчет функций полезности на следующих уровнях

Для каждой  $m$ -ой машины с учетом момента ее возможного освобождения, рассчитываются значения  $U_{l+1,z,k,m}$  и  $\bar{V}_{l+1,z,k,m}$  по формулам 3.27 и (3.20, 3.26).

КОНЕЦ ЦИКЛА по машинам для каждой работы

КОНЕЦ ЦИКЛА по работам в узле

**КОНЕЦ ЦИКЛА** по узлам уровня

**Шаг 5** Определение доминируемых узлов дерева

**ЕСЛИ** уровень  $l + 1$  не является последним, то для доминирования на  $l + 1$ -ом уровне возможного узла  $y$  дерева над возможным узлом  $x$  необходимо, чтобы соблюдались неравенства

$$U_{l+1,y} \leq U_{l+1,x}, \bar{V}_{l+1,y} \geq \bar{V}_{l+1,x}, g_{l+1,y} < g_{l+1,x}, \quad (3.34)$$

причем первое или второе неравенство должно быть строгим.

**ИНАЧЕ** для доминирования на последнем уровне  $l + 1$  необходимо, чтобы

$$U_{l+1,y} \leq U_{l+1,x}, \bar{V}_{l+1,y} \geq \bar{V}_{l+1,x}. \quad (3.35)$$

**Шаг 6** Проверка длительности ветви на уровне

**ЕСЛИ** для отобранной ветви дерева несправедливо неравенство 3.32, такая ветвь решения отбрасывается.

**Шаг 7** Переход на новый уровень или окончание работы программы

**ЕСЛИ** уровень больше последнего (выполнены все операции), то окончание работы.

**ИНАЧЕ** Увеличение номера уровня  $l = l + 1$  и переход на шаг 2.

**КОНЕЦ ЦИКЛА** по уровням

Поскольку механизм отсечения ветвей построен на отборе ветвей с хотя бы одним наилучшим критерием  $U$  или  $\bar{V}$ , этот алгоритм является многокритериальным «жадным» алгоритмом [Сапоп and Jeannot, 2011]. Правда, такая «жадность» несколько смягчается условием проверки величины требуемого момента запуска каждой работы  $g_i$ . Это условие обеспечивает включение во множество отобранных ветвей работ с более ранним моментом запуска.

После проведения отсечения по неравенствам 3.34 проводится определение ветви с наименьшей возможной длительностью. Затем остальные ветви сравниваются с наиболее короткой ветвью, и часть ветвей, не удовлетворяющих условию 3.32 отбрасывается. Таким образом, обеспечивается устранение наиболее продолжительных, и соответственно, неприемлемых решений и уменьшается количество вычислений.

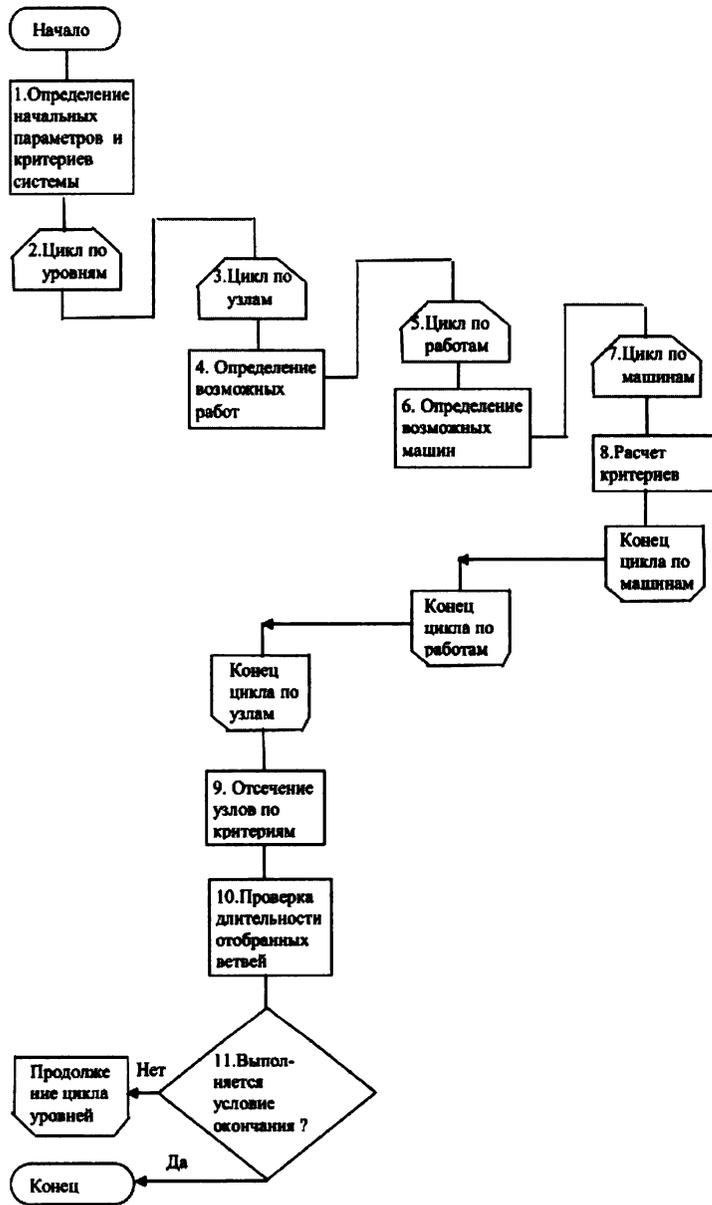


Рис. 3.8 Блок-схема вычислений по дереву расписаний

### 3.6 Вычисление интегралов напряженности заказов

Положим, что в некоторый момент времени  $C_l$  уже закончено выполнение  $l$  работ и после этого в момент  $t_k$  начинается выполнение  $k$ -ой работы. Средняя полезность всего имеющегося набора работ за все время  $F_k$  от начала работ до выполнения  $k$ -ой работы с учетом возможных перерывов определяется по рекуррентной формуле 3.20. Для нахождения величины интеграла  $\int_{C_l}^{t_k+p_k} V_k dt$  используется выражение функции текущей полезности заказов по формуле 3.10.

Значения напряженности определяются по формулам 3.6. Таким образом, для определения значения средней полезности  $\bar{V}_{l+1,k}$  требуется вычислять значения определенных интегралов  $\int_{C_l}^{F_k} H_i dt$ .

Для  $i$ -ых работ, которые не являются выполняемыми в момент  $t_k$ , вариант расчета напряженности определяется взаимным расположением моментов  $C_l$ ,  $d_i$  и  $F_k$ . Для работы  $k$ , которая является выполняемой в момент  $t_k$ , вариант расчета напряженности определяется взаимным расположением моментов  $C_l$ ,  $t_k$ ,  $d_k$  и  $F_k$  а также точек начала перерыва  $B_1$  и конца перерыва  $B_2$ . На рис. 3.9 показаны 9 таких возможных вариантов.

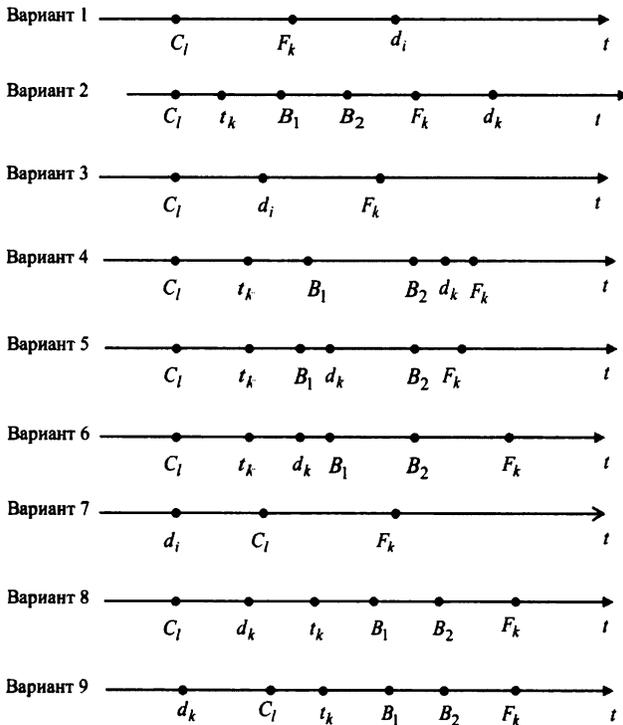


Рис. 3.9 Варианты расположения параметров

В варианте 1 интеграл напряженности вычисляется для работы  $i$ , которая не является выполняемой в момент  $t_k$ , и требуемый момент выполнения которой  $d_i$  находится за точкой  $t_k + p_k$  выполнения  $k$ -ой работы. Вариант 2 отличается от варианта 1 тем, что напряженность определяется для работы  $k$ , выполнение которой начинается в момент  $t_k$ .

Вариант 3 существует для невыполняемой работы в том случае, когда требуемый для нее момент выполнения  $d_i$  находится между точками  $C_i$  окончания предыдущей работы и точкой  $F_k$  выполнения  $k$ -ой работы. В варианте 4 интеграл напряженности определяется для работы, выполнение которой начинается в момент  $t_k$ , а требуемый момент выполнения находится между точками  $B_2$  окончания перерыва в работе и точкой  $F_k$ . В варианте 5 требуемый момент выполнения находится между точками  $B_1$  начала перерыва и точкой  $B_2$  его окончания. В варианте 6 момент выполнения  $d_i$  находится между точками  $t_k$  и  $B_1$ .

В варианте 7 для невыполняемой работы  $i$  требуемый для нее момент выполнения  $d_i$  находится раньше точки  $C_i$ . В случае варианта 8 для работы, выполнение которой начинается в момент  $t_k$ , требуемый момент ее выполнения находится между точками  $C_i$  окончания предыдущей работы и точкой  $t_k$ . В последнем варианте 9 требуемый момент выполнения работы, начинающейся в  $t_k$ , находится раньше точки  $C_i$ .

Правила выбора конкретного варианта приведены в табл. 3.1. Параметр  $a_k^i$  может иметь одно из трех значений: 0 – для работ, уже выполненных к моменту  $t_k$ ; 1 – для работ, еще не выполненных и не включенных в  $k$ -ую партию; 0,5 – для еще не выполненных работ, включенных в  $k$ -ую партию.

Если  $a_k^i = 0$ , интеграл напряженности не рассчитывается.

В табл. 3.1 предполагается, что суммарная величина перерывов в течение одной работы расположена на одинаковом расстоянии от начала и окончания работы, и поэтому точки  $B_1$  и  $B_2$  находятся на одинаковом расстоянии от точек  $t_k$  и  $F_k$ , равном  $p_k/2$ . Во всех колонках таблицы неравенства, содержащие отношение больше нуля, не могут применяться для вычислений при равенстве левой и правой части. Причина такого положения состоит в том, что интегралы напряженности в этих случаях содержат логарифмы от разности вычитаемых величин, и соответственно, не могут быть вычислены, когда такая разница равна нулю.

Для вывода расчетных выражений из интегралов напряженности используются три формулы для неопределенных интегралов:

$$\int (a + bt + ct^2)dt = at + \frac{b}{2}t^2 + \frac{c}{3}t^3, \quad (3.36)$$

**Таблица 3.1** Правила выбора варианта формулы расчета интегралов напряженности

$a_k^i$	$d_i - F_k$	$d_i - t_k$	$d_i - C_i$	$d_i - (F_k - p_k/2)$	$d_i - (F_k + p_k/2)$	Вар. для $H_k^i$
1	$> 0$	-	-	-	-	1
0.5	$> 0$	-	-	-	-	2
1	$\leq 0$	-	$> 0$	-	-	3
0.5	$\leq 0$	$> 0$	$> 0$	$> 0$	-	4
0.5	$\leq 0$	$> 0$	$> 0$	$\leq 0$	$> 0$	5
0.5	$\leq 0$	$> 0$	$> 0$	-	$\leq 0$	6
1	$\leq 0$	$\leq 0$	$\leq 0$	-	-	7
0.5	$\leq 0$	$\leq 0$	$> 0$	-	-	8
0.5	$\leq 0$	$\leq 0$	$\leq 0$	-	-	9

$$\int \frac{dt}{at+b} = \frac{1}{a} \ln |at+b|, \quad a \neq 0, \quad (3.37)$$

$$\int \frac{tdt}{at+b} = \frac{t}{a} - \frac{b}{a^2} \ln |at+b|, \quad a \neq 0. \quad (3.38)$$

Ниже приведены значения определенных интегралов напряженности.

Самым распространенным является первый вариант, используемый для работ, не являющимися выполнимыми в текущий момент, т.е. при  $i \neq k$ , и для которых момент окончания текущей работы находится раньше, чем их срок выполнения, т.е.  $d_i - F_k \geq 0$ . Используя зависимость  $H_i$  от времени, согласно первому из выражений 3.6 и формуле 3.37, по правилам вычисления определенного интеграла получим для варианта 1

$$\int_{C_i}^{F_k} H_i dt = \alpha w_i p_i \ln \left[ \frac{(d_i - C_i)/\alpha G + 1}{(d_i - F_k)/\alpha G + 1} \right]. \quad (3.39)$$

В варианте 2 напряженность определяется для работы  $k$ , выполнение которой начинается в момент  $t_k$ . Поскольку каждый момент времени выполнения этой работы меньше ее срока выполнения  $d_k$ , величина напряженности, как и в предыдущем случае, может определяться по первому из выражений 3.6.

Для вычисления соответствующего определенного интеграла, имеем 4 участка: первый участок от точки  $C_l$  до точки  $t_k$ , на котором работа еще не начала выполняться, и второй участок – от  $t_k$  до начала перерыва точки  $B_1$ ; третий участок заканчивается точкой  $B_2$  конца перерыва; четвертый участок длится до точки  $F_k$  непосредственного выполнения:

$$\int_{C_l}^{F_k} H_k dt = \int_{C_l}^{t_k} H_k dt + \int_{t_k}^{B_1} H_k dt + \int_{B_1}^{B_2} H_k dt + \int_{B_2}^{d_k} H_k dt + \int_{d_k}^{F_k} H_k dt. \quad (3.40)$$

На первом участке интеграл от напряженности может вычисляться по формуле, аналогичной 3.39, т.е.

$$\int_{C_l}^{t_k} H_k dt = \alpha w_k p_k \ln \left[ \frac{(d_k - C_l)/\alpha G + 1}{(d_k - t_k)/\alpha G + 1} \right]. \quad (3.41)$$

На втором участке величина остающейся трудоемкости работы уменьшается со временем. Полагая это изменение линейным, получаем для второго участка

$$H_k = \frac{w_k(p_k - (t - t_k))}{G} \frac{1}{(d_k - t)/\alpha G + 1}. \quad (3.42)$$

Используя для вычислений интегралов формулы 3.33 и 3.34, получим для второго участка

$$\begin{aligned} & \int_{t_k}^{t_k+p_k/2} H_k dt = \\ & = \alpha w_k \left[ \frac{p_k}{2} - (d_k - t_k - p_k + \alpha G) \ln \left( \frac{(d_k - t_k)/\alpha G + 1}{(d_k - t_k - p_k/2)/\alpha G + 1} \right) \right]. \end{aligned} \quad (3.43)$$

На третьем участке, полагая, что трудоемкость работы равна  $p_k/2$ , имеем формулу, аналогичную 3.41

$$\int_{t_k+p_k/2}^{F_k-p_k/2} H_k dt = \frac{\alpha w_k p_k}{2} \ln \left[ \frac{(d_k - (t_k + p_k/2))/\alpha G + 1}{(d_k - (F_k - p_k/2))/\alpha G + 1} \right]. \quad (3.44)$$

На четвертом участке с учетом уменьшения трудоемкости со временем, имеем

$$H_k dt = \frac{w_k(F_k - t)}{G} \frac{1}{(d_k - t)/\alpha G + 1}, \quad (3.45)$$

и выражение

$$\begin{aligned} & \int_{F_k-p_k/2}^{F_k} H_k dt = \\ & = \alpha w_k \left[ \frac{p_k}{2} - (d_k - F_k + \alpha G) \ln \left( \frac{(d_k - (F_k - p_k/2))/\alpha G + 1}{(d_k - F_k)/\alpha G + 1} \right) \right]. \end{aligned} \quad (3.46)$$

Таким образом, интеграл напряженности для варианта 2 определяется как сумма выражений 3.41, 3.43, 3.44 и 3.46.

В варианте 3 сложность вычислений обусловлена тем, что выражение для напряженности невыполняемой работы  $i$  для различных участков вычисления различна. На участке от точки  $C_i$  до точки  $d_i$  напряженность рассчитывается по первому выражению 3.6, а на участке от точки  $d_i$  до точки  $t_k + p_k$  – по второму выражению 3.6. Поэтому на первом участке интеграл напряженности вычисляется с помощью формулы 3.37, а на втором – по формуле 3.36. В результате имеем

$$\begin{aligned} \int_{C_i}^{F_k} H_i dt &= \alpha w_i p_i \ln \left( \frac{d_i - C_i}{\alpha G} + 1 \right) + \\ &+ \frac{w_i p_i}{G} \left( 1 - \frac{d_i}{\alpha G} \right) (F_k - d_i) + \frac{w_i p_i}{2\alpha G^2} (F_k^2 - d_i^2). \end{aligned} \quad (3.47)$$

Для расчета интеграла напряженности выполняемой работы  $k$  в варианте 4, заметим, что весь интервал расчета должен быть разбит на 5 участков: первый от точки  $C_i$  до точки  $t_k$ ; второй участок от точки  $t_k$  до начала перерыва – точки  $B_1$ ; третий участок заканчивается точкой  $B_2$  конца перерыва; участок 4 длится до точки  $d_k$  и, наконец, пятый участок от точки  $d_k$  до точки  $F_k$ , т.е.

$$\int_{C_i}^{F_k} H_k dt = \int_{C_i}^{t_k} H_k dt + \int_{t_k}^{B_1} H_k dt + \int_{B_1}^{B_2} H_k dt + \int_{B_2}^{d_k} H_k dt + \int_{d_k}^{F_k} H_k dt. \quad (3.48)$$

В данном случае на первом участке интеграл рассчитывается по формуле 3.41, на втором участке по формуле 3.43, на третьем участке – по формуле 3.44.

На четвертом участке и пятом участках напряженность имеет вид:

$$H_k = \frac{w_k(F_k - t)}{G} \frac{1}{(d_k - t)/\alpha G + 1}$$

и

$$H_k = \frac{w_k(F_k - t)}{G} \left( \frac{1 - d_k}{\alpha G} + 1 \right).$$

Поэтому на четвертом участке, пользуясь формулами 3.37 и 3.38, имеем

$$\int_{F_k - p_k/2}^{d_k} H_k dt = \alpha w_k \left[ d_k - \left( F_k - \frac{p_k}{2} \right) - (F_k + \alpha G) \ln \left( \frac{d_k - (F_k - p_k/2)}{\alpha G} + 1 \right) \right].$$

Используя формулу 3.36, получим для пятого участка

$$\int_{d_k}^{F_k} H_k dt = \frac{w_k}{G} F_k \left( 1 - \frac{d_k}{\alpha G} \right) (F_k - d_k) - \frac{w_k}{2G} \left( 1 - \frac{F_k + d_k}{\alpha G} \right) (F_k^2 - d_k^2) - \frac{w_k}{3\alpha G^2} (F_k^3 - d_k^3).$$

Полное значение интеграла напряженности по варианту 4 определяется суммированием выражений 3.41, 3.43, 3.44, 3.50 и 3.51.

В варианте 5 интервал расчета должен быть разбит на 5 участков: первый от точки  $C_l$  до точки  $t_k$ ; второй участок от точки  $t_k$  до начала перерыва – точки  $B_1$ ; третий участок длится до точки  $d_k$ ; четвертый участок заканчивается точкой  $B_2$  конца перерыва; и, наконец, пятый участок от точки  $B_2$  до точки  $F_k$ , т.е.

$$\int_{C_l}^{F_k} H_k dt = \int_{C_l}^{t_k} H_k dt + \int_{t_k}^{B_1} H_k dt + \int_{B_1}^{d_k} H_k dt + \int_{d_k}^{B_2} H_k dt + \int_{B_2}^{F_k} H_k dt.$$

В данном случае на первом участке интеграл рассчитывается по формуле 3.41, на втором участке по формуле 3.43. На третьем участке и четвертом участке имеем формулу, аналогичную 3.47

$$\int_{t_k + p_k/2}^{d_k} H_k dt + \int_{d_k}^{F_k - p_k/2} H_k dt = \frac{\alpha w_k p_k}{2} \ln \left( \frac{d_k - t_k - p_k/2}{\alpha G} + 1 \right) + \frac{w_k p_k}{2G} \left( 1 - \frac{d_k}{\alpha G} \right) (F_k - p_k/2 - d_k) + \frac{w_k p_k}{4\alpha G^2} (F_k - (p_k/2)^2 - d_k^2).$$

На пятом участке используется формула, аналогичная 3.51

$$\int_{F_k - p_k/2}^{F_k} H_k dt = \frac{w_k p_k}{2G} F_k \left( 1 - \frac{d_k}{\alpha G} \right) - \frac{w_k}{2G} \left( 1 - \frac{F_k + d_k}{\alpha G} \right) [F_k^2 - (F_k - p_k/2)^2] - \frac{w_k}{3\alpha G^2} [F_k^3 - (F_k - p_k/2)^3].$$

В варианте 6 интервал расчета должен быть разбит на 5 участков: первый от точки  $C_1$  до точки  $t_k$ ; второй участок от точки  $t_k$  до точки  $d_k$ ; третий участок – начала перерыва точки  $B_1$ ; четвертый участок заканчивается точкой  $B_2$  конца перерыва; и, наконец, пятый участок от точки  $B_2$  до точки  $F_k$ , т.е.

$$\int_{C_1}^{F_k} H_k dt = \int_{C_1}^{t_k} H_k dt + \int_{t_k}^{d_k} H_k dt + \int_{d_k}^{B_1} H_k dt + \int_{B_1}^{B_2} H_k dt + \int_{B_2}^{F_k} H_k dt. \quad (3.55)$$

На первом участке интеграл рассчитывается по формуле 3.41. На втором участке используется зависимость, аналогичная 3.43

$$\int_{t_k}^{d_k} H_k dt = \alpha w_k \left[ d_k - t_k - (d_k - t_k - p_k + \alpha G) \ln \left( \frac{d_k - t_k}{\alpha G} + 1 \right) \right]. \quad (3.56)$$

На третьем участке имеем

$$\begin{aligned} \int_{d_k}^{t_k + p_k/2} H_k dt &= \frac{w_k}{G} (t_k + p_k) \left( 1 - \frac{d_k}{\alpha G} \right) (t_k + p_k/2 - d_k) - \\ &- \frac{w_k}{2G} \left( 1 - \frac{t_k + p_k + d_k}{\alpha G} \right) \left[ (t_k + p_k/2)^2 - d_k^2 \right] - \frac{w_k}{3\alpha G^2} \left[ (t_k + p_k/2)^3 - d_k^3 \right]. \end{aligned} \quad (3.57)$$

На четвертом участке

$$\begin{aligned} \int_{t_k + p_k/2}^{F_k - p_k/2} H_k dt &= \frac{w_k p_k}{2G} \left( 1 - \frac{d_k}{\alpha G} \right) (F_k - t_k - p_k) + \\ &+ \frac{w_k p_k}{4\alpha G^2} \left[ (F_k - p_k/2)^2 - (t_k + p_k/2)^2 \right]. \end{aligned} \quad (3.58)$$

На пятом участке используется формула 3.54. В результате полное значение интеграла получается суммированием выражений 3.41, 3.55 – 3.57 и 3.54.

В варианте 7 напряженность не выполняемой работы  $i$  на протяжении всего интервала определяется по второму выражению 3.6 и интеграл рассчитывается по формуле 3.36:

$$\int_{C_1}^{F_k} H_i dt = \frac{w_i p_i}{G} \left( 1 - \frac{d_i}{\alpha G} \right) (F_k - C_1) + \frac{w_i p_i}{2\alpha G^2} (F_k^2 - C_1^2). \quad (3.59)$$

В случае варианта 8 интервал расчета должен быть разбит на 5 участков: первый от точки  $C_1$  до точки  $d_k$ ; второй участок от  $d_k$  до точки  $t_k$ ; третий участок длится до начала перерыва – точки  $B_1$ ; четвертый участок заканчивается точкой  $B_2$  конца перерыва; и, наконец, пятый участок от точки  $B_2$  до точки  $F_k$ , т.е.

$$\int_{C_1}^{F_k} H_k dt = \int_{C_1}^{d_k} H_k dt + \int_{d_k}^{t_k} H_k dt + \int_{t_k}^{B_1} H_k dt + \int_{B_1}^{B_2} H_k dt + \int_{B_2}^{F_k} H_k dt. \quad (3.60)$$

На первом участке интеграл от напряженности может вычисляться по формуле, аналогичной 3.39, у которой знаменатель под знаком логарифма обращается в единицу

$$\int_{C_l}^{d_k} H_k dt = \alpha w_k p_k \ln \left( \frac{d_k - C_l}{\alpha G} + 1 \right). \quad (3.61)$$

На втором и третьем участках напряженность рассчитывается по второму выражению 3.6. Используя формулу 3.36, получим на втором участке

$$\int_{d_k}^{t_k} H_k dt = \frac{w_k p_k}{G} \left( 1 - \frac{d_k}{\alpha G} \right) (t_k - d_k) + \frac{w_k p_k}{2\alpha G^2} (t_k^2 - d_k^2), \quad (3.62)$$

и, учитывая линейное уменьшение величины остающейся трудоемкости работы  $p_k$  на третьем участке, имеем

$$\begin{aligned} \int_{t_k}^{t_k + p_k/2} H_k dt &= \frac{w_k p_k}{2G} (t_k + p_k) \left( 1 - \frac{d_k}{\alpha G} \right) - \\ &- \frac{w_k}{2G} \left( \frac{t_k + p_k + d_k}{\alpha G} \right) [(t_k + p_k/2)^2 - t_k^2] - \frac{w_k}{3\alpha G^2} [(t_k + p_k/2)^3 - t_k^3]. \end{aligned} \quad (3.63)$$

Полное значение интеграла напряженности по варианту 8 определяется суммированием выражений 3.61 – 3.63, 3.58 и 3.54.

В варианте 9 интеграл напряженности разбивается на 4 участка: первый участок от точки  $C_l$  до точки  $t_k$ ; второй участок от  $t_k$  до начала перерыва – точки  $B_1$ ; третий участок заканчивается точкой  $B_2$  конца перерыва; и, наконец, четвертый участок от точки  $B_2$  до точки  $F_k$ . На обоих участках напряженность рассчитывается по второму выражению 3.6 и формуле 3.36.

$$\int_{C_l}^{F_k} H_k dt = \int_{C_l}^{t_k} H_k dt + \int_{t_k}^{B_1} H_k dt + \int_{B_1}^{B_2} H_k dt + \int_{B_2}^{F_k} H_k dt. \quad (3.64)$$

На первом участке

$$\int_{C_l}^{t_k} H_k dt = \frac{w_k p_k}{G} \left( 1 - \frac{d_k}{\alpha G} \right) (t_k - C_l) + \frac{w_k p_k}{2\alpha G^2} (t_k^2 - C_l^2). \quad (3.65)$$

Полное значение интеграла определяется суммированием выражений 3.65, 3.63, 3.58 и 3.54.

# Стандартные функции для расчета расписаний

4.1 Функция расчета интегралов напряженности .....	55	4.7 Функция определения возможности начала непрерывного процесса .....	65
4.2 Функция вызова интегралов напряженности .....	56	4.8 Вспомогательные функции .....	68
4.3 Функция расчета критериев .....	57	4.8.1 Функция расчета времени выполнения программы .....	68
4.4 Функция пересчета трудоемкости работы к календарным часам .....	58	4.8.2 Функция определения полезности заказов в начале расчета .....	68
4.5 Функция поступления работ на машину в рабочее время .....	63	4.8.3 Функция поиска строки в списке по известному номеру работы .....	69
4.6 Функция числа рабочих часов в заданном календарном сроке .....	64	4.9 Функции графического отображения результатов планирования .....	69

## 4.1 Функции расчета интегралов напряженности

Всего используется 9 функций расчета интеграла напряженности  $H1()$  –  $H9()$ , соответствующих вариантам, описанным в п. 3.6. Три функции –  $H1()$ ,  $H3()$  и  $H7()$  описывают напряженность работ, невыполняемых при построении новой ветви дерева решений; остальные функции относятся к непосредственно выполняемым работам. На рис. 4.1 приведен листинг функции  $H1()$ .

При вызове каждой функции  $H1()$ ,  $H3()$  и  $H7()$  указываются входные значения трудоемкости текущей  $i$ -ой работы  $snPi$ , ее коэффициент приоритет  $snW$ , требуемый момент выполнения  $i$ -ой работы в календарных часах относительно момента планирования  $snD$ , момент окончания предыдущей работы машины  $snCl$  в календарных часах, планируемый момент окончания непосредственно выполняемой работы  $k$ -ой работы  $snFk$ . В качестве постоянных коэффициентов используются психологический коэффициент  $a$  и плановый период  $G$  в календарных часах. При обращении к остальным функциям указываются входное значение трудоемкости текущей  $k$ -ой работы  $snPk$ , а также момент начала выполнения новой работы  $snTk$  (рис. 4.2).

Текст функций  $H1()$  –  $H9()$  составлен в соответствии с выражениями в п. 3.6 для каждого варианта.

```
Function H1(snW, snPi, snD, snCl, snFk) 'первый вариант'
H1 = a * snW * snPi * Log(((snD - snCl) / a / G + 1) / ((snD - snFk) / a / G + 1))
End Function
```

Рис. 4.1 Листинг функции  $H1()$

```
Function H2(snW, snPk, snD, snCl, snTk, snFk) 'второй вариант'
```

Рис. 4.2 Заголовок функции *H2()*

## 4.2 Функция вызова интегралов напряженности

Та или иная функция *H1()* – *H9()* вызывается для расчета напряженности в соответствии текущим вариантом в табл. 3.1. Для этой цели используется функция *Vybor()*, листинг которой приведен на рис. 4.3.

При каждом обращении к функции *Vybor()* ей передаются: указатель выполнения текущей работы *snAJ*, коэффициент приоритета работы *snW*, значение трудоемкости текущей *i*-ой работы *snPi*, значение трудоемкости выполняемой *k*-ой работы *snPk*, требуемый момент выполнения *i*-ой работы в календарных часах относительно момента планирования *snD*, момент окончания предыдущей работы машины *snCl* в календарных часах, момент начала выполне-

```
Function Vybor(snAJ, snW, snPi, snPk, snD, snCl, snTk, snFk)
Dim snGsm As Single
If snAJ = 0 Then 'для уже законченных работ
Vybor = 0
Else
If snAJ = 0.5 Then 'для непосредственно выполняемой работы
snGsm = snW * snPk * (snFk - snPk / 2 - snCl) / G 'положительное слагаемое в функции полезности
If snD - snFk > 0 Then 'если срок заказа больше окончания выполнения
Vybor = snGsm - H2(snW, snPk, snD, snCl, snTk, snFk) 'вычисляется напряженность в варианте 2
Else 'если срок заказа меньше окончания выполнения
If snD - snTk > 0 Then 'если срок заказа больше момента начала
'If snD - (snFk - snPk / 2) > 0 Then 'если срок заказа больше конца перерыва
If snD - snFk > 0 Then 'если срок заказа больше конца перерыва
Vybor = snGsm - H4(snW, snPk, snD, snCl, snTk, snFk) 'вычисляется напряженность в варианте 4
Else 'если срок заказа меньше конца перерыва
If snD - (snTk + snPk / 2) > 0 Then 'если срок заказа больше начала перерыва
Vybor = snGsm - H5(snW, snPk, snD, snCl, snTk, snFk) 'вычисляется напряженность в варианте 5
Else 'если срок заказа меньше начала перерыва
Vybor = snGsm - H6(snW, snPk, snD, snCl, snTk, snFk) 'вычисляется напряженность в варианте 6
End If
End If
Else 'если срок заказа меньше момента начала
If snD - snCl > 0 Then 'если срок заказа больше момента освобождения машины
Vybor = snGsm - H8(snW, snPk, snD, snCl, snTk, snFk) 'вычисляется напряженность в варианте 8
Else 'если срок заказа меньше момента освобождения машины
Vybor = snGsm - H9(snW, snPk, snD, snCl, snTk, snFk) 'вычисляется напряженность в варианте 9
End If
End If
Else 'для непосредственно не выполняемой работы
snGsm = snW * snPi * (snFk - snCl) / G 'положительное слагаемое в функции полезности
If snD - snFk > 0 Then 'если срок заказа больше окончания выполнения
Vybor = snGsm - H1(snW, snPi, snD, snCl, snFk) 'вычисляется напряженность в варианте 1
Else 'если срок заказа меньше окончания выполнения
If snD - snCl > 0 Then 'если срок заказа больше момента освобождения машины
Vybor = snGsm - H3(snW, snPi, snD, snCl, snFk) 'вычисляется напряженность в варианте 3
Else 'если срок заказа меньше момента освобождения машины
Vybor = snGsm - H7(snW, snPi, snD, snCl, snFk) 'вычисляется напряженность в варианте 7
End If
End If
End If
End Function
```

Рис. 4.3 Листинг функции *Vybor()*

ния новой работы  $snTk$ , планируемый момент окончания непосредственно выполняемой работы  $k$ -ой работы  $snFk$ .

Указатель выполнения текущей работы может иметь 3 значения: 1, 0,5 и 0. В первом случае работа непосредственно не выполняется, во втором случае – происходит ее выполнение. Для уже выполненных работ указатель устанавливается в значение 0.

В соответствии с табл. 3.1, при выборе текущего варианта функции  $H1() - H9()$  учитываются параметры  $d_i - F_k$ ,  $d_i - t_k$ ,  $d_i - C_l$ ,  $d_i - (F_k - p_k/2)$ ,  $d_i - (t_k + p_k/2)$ , которые в обозначениях функции  $Vybor()$  имеют выражения  $snD - snFk$ ,  $snD - snTk$ ,  $snD - snCl$ ,  $snD - (snFk - snPk/2)$ ,  $snD - (snTk + snPk/2)$ .

Функция  $Vybor()$  используется для расчета средней полезности всего объема планируемых работ за время от начального момента  $t = 0$  до момента окончания последней уже запланированной работы  $C_l$  по формуле 3.20. Поэтому значение функции  $Vybor()$  равно разнице между составляющей первого интеграла в правой части 3.21 от  $i$ -ой работы  $\gamma_k^i$  и соответствующей функцией интеграла напряженности, поделенной на отрезок времени до момента окончания выполняемой  $k$ -ой работы  $F_k$ . Величина  $\gamma_k^i$  в листинге на рис. 4.3 описывается переменной  $snGam$ , которая определяется по формуле 3.22 или 3.23.

В табл. 3.1 для варианта 4 в соответствии с допущением о том, суммарная величина перебоев в течение одной работы расположена на одинаковом расстоянии от начала и окончания работы, используется неравенство  $d_i - (F_k - p_k/2) > 0$ . В том случае, если это допущение нарушается, возможно возникновение ситуации, при которой  $d_i - (F_k - p_k/2) < 0$ , что приводит к нарушению работы программы. Поэтому в листинге на рис. 4.3 вместо неравенства  $d_i - (F_k - p_k/2) > 0$  используется более сильное неравенство  $d_i - F_k > 0$ . Расчеты показывают, что такая замена весьма незначительно влияет на величину функции  $Vybor()$ .

### 4.3 Функции расчета критериев

Средняя полезность всего имеющегося набора работ  $J$  за все время от начала работ до окончания выполнения  $k$ -ой работы в момент  $t_k + p_k$  в узле на уровне  $l + 1$  определяется по рекуррентной формуле 3.18

$$\bar{V}_{l+1,k} = \frac{1}{t_k + p_k} \int_0^{t_k + p_k} V dt = \frac{1}{t_k + p_k} \left( \bar{V}_l \times C_l + \int_{C_l}^{t_k + p_k} V_k dt \right).$$

При построении каждой ветви дерева решений рассчитывается значение интеграла в правой части этой формулы при помощи специальной программной функции  $VZak()$ , листинг которой приведен на рис. 4.4. При этом используется выражение 3.10.

При вызове функции  $VZak()$  указывается полное количество работ  $inBeta$ , номер строки выполняемой работы  $ink$ , момент окончания предыдущей работы машины  $snCl$  в календарных часах, момент начала выполнения новой работы  $snTk$ , планируемый момент окончания непо-

```
Function VZak(inBeta, ink, snCl, snTk, snFk)
VZak = 0
For i = 1 To inBeta 'цикл по всем работам
VZak = VZak + Vybor(aJ(i), W(i), p(i), p(ink), d(i), snCl, snTk, snFk) 'накопление функции полезности
Next i
End Function
```

Рис. 4.4 Листинг функции  $VZak()$

средственно выполняемой работы  $k$ -ой работы  $snFk$ . В процессе расчета величина функции накапливается суммированием полезности для всех планируемых работ.

Величина относительных издержек на переналадку на уровне  $l + 1$  до окончания выполнения  $k$ -ой работы на машине  $m$  определяется в системе по формуле 3.27 как сумма издержек переналадок, включая все ранее выполненные работы.

Для этого используется специальная функция  $UZak()$ , листинг которой приведен на рис. 4.5. При вызове функции  $UZak()$  указывается новая строка работ  $ink$ , предыдущая строка работ  $inl$  и вид работы при начальном состоянии машины  $inVid$ . Величина функции  $UZak()$  определяется значением трудоемкости  $s$  переналадки машины в часах. В расчет входят константы стоимости одного часа наладки  $CH$  и стоимости смены  $c$ .

```
Function UZak(ink, inl, inVid) 'ink - новая строка работ, inl - предыдущая строка работ, inVid - начальная установка вида раб
  If inVid > 0 Then
    UZak = CH * s(Vid(ink), inVid) / c 'относительные затраты времени переналадки'
  Else
    UZak = CH * s(Vid(ink), Vid(inl)) / c
  End If
End Function
```

Рис. 4.5 Листинг функции  $UZak()$

#### 4.4 Функция пересчета трудоемкости работы к календарным часам

В задании на планирование продолжительность планового выполнения работы (партии) указывается в часах непрерывной работы. В то же время календарный график работы подразделения обычно предусматривает нерабочее время. В рабочие дни используется только часть суточного времени – в одну или несколько смен; часть дней являются нерабочими или праздничными. Поэтому система использует функцию  $Calend()$  пересчета расчетной продолжительности выполнения работы с учетом календарного графика. Листинг верхней части функции  $Calend()$  для одиночной машины приведен на рис. 4.6.

При вызове функции указывается начальный момент выполнения работы в календарных часах  $inBeg$ , длительность непрерывного выполнения работы  $inD$  в часах и флаг типа использования функции  $inF$ . Флаг имеет значение 1, если функция применяется для расчета момента начала выполнения работы, и равен 2, когда функция используется для момента завершения работы.

В начале расчета рассчитывается количество полных календарных дней  $n$  начала выполнения плановой работы, отсчитывая от момента планирования. Затем определяется остаток рабочих часов  $Ost$  в день начала выполнения работы. Величина этого остатка зависит от того, является ли рабочий день круглосуточным. Кроме того, на величину  $Ost$  влияет продолжительность предыдущего рабочего дня или наличие нерабочего дня.

Выше в п. 2.3 указывалось, что плановая служба цеха составляет расписание для следующего рабочего дня. Длительность этого дня существенно зависит от длительности работы в предыдущий календарный день. Если смены предыдущего дня не переходят на последующий день, т.е. работа посменная, но не круглосуточная, то расписание следующего рабочего дня полностью укладывается в течение нового календарного дня.

При круглосуточной работе последняя (ночная) смена предыдущего дня работает фактически в течение нового календарного дня. Поэтому при составлении задания на новый рабочий день необходимо учитывать состояние производства в период от начала календарного дня до

```

Function Calend(inBeg, inD, inF) ' функция преобразования рабочей длительности в календарную
Dim Per As Single
Dim Ost As Single
If inBeg > 0 And Int(inBeg / 24) = inBeg / 24 Then 'если момент начала совпадает с моментом изменения даты
  n = Int(inBeg / 24) 'количество полных календарных дней начала
Else
  n = Int(inBeg / 24) + 1 'количество полных календарных дней начала
End If
If E(n) > 0 Then 'если день рабочей
If E(n) < 24 Then 'если длительность текущего рабочего дня меньше суток
If Vid0 > 0 And n = 1 And K0 <= Tn And K0 >= 0 Then 'если в первый день есть начальная настройка на вид работы
  Ost = inBeg 'остаток рабочих часов равен исходному началу
Else 'если нет начальной настройки, а также для других дней
  Ost = inBeg - Tn - (n - 1) * 24 'остаток рабочих часов в последний рабочий день начала
If Ost < 0 Then 'остаток рабочих часов равен нулю
  Ost = 0
End If
End If
If n > 1 Then 'для дней после первого
If E(n - 1) = 24 Then 'если предыдущий рабочий день равен суткам
  Ost = inBeg - (n - 1) * 24 'остаток рабочих часов в последний рабочий день начала
End If
End If
Else 'если длительность рабочего дня равна суткам
Ost = inBeg - (n - 1) * 24 'остаток рабочих часов в последний рабочий день начала
If n > 1 Then 'для дней после первого
If E(n - 1) = 0 Then 'если предыдущий день нерабочий
  Ost = Ost - Tn 'остаток рабочих часов в первый рабочий день после нерабочего
End If
End If
End If
Else 'если день нерабочий
If E(n - 1) = 24 Then 'если предыдущий рабочий день круглосуточный
  Ost = inBeg - (n - 1) * 24 'остаток рабочих часов в последний рабочий день начала
End If
End If
...
End Function

```

Рис. 4.6 Фрагмент верхней части листинга функции *Calend()* для оди-  
ночной машины

момента начала его первой смены. Особенно это важно при корректировке плана последующего дня при появлении в этот день срочной работы.

Если продолжительность нового рабочего дня составляет 24 часа, величина остатка рабочих часов *Ost* равна начальному моменту расчета *inBeg* за вычетом количества времени прошедших дней. Если длительность нового рабочего дня меньше 24 часов (например, в предпраздничный день), то ситуация усложняется.

В функции *Calend()* проводится анализ описанного варианта. Для этого проверяется наличие первоначальной настройки *Vid0* в первый день нового планирования *n*, а также момент освобождения машины *K0*. Полагается, что в случае, когда настройка машины на конкретный вид работы *Vid0* отлична от нуля, а время освобождения машины приходится на ночной период, этот период является рабочим, и в таком случае остаток рабочих часов *Ost* равен начальному моменту расчета *inBeg*. В противном случае остаток рабочих часов *Ost* должен отсчитываться от момента начала первой смены *Tn*.

В том случае, когда длительность рабочего дня после первого дня меньше 24 часов, а длительность предыдущего рабочего дня составляет 24 часа, величина остатка рабочих часов *Ost* равна начальному моменту расчета *inBeg* за вычетом количества времени прошедших дней.

Затем в цикле по календарному графику определяются рабочие дни (рис. 4.7). Для каждого дополнительного рабочего дня *m* вычисляется перенос *Per* остающейся продолжительности

```

Calend = 0
m = 0
For j = n To Delta 'цикл по календарю
If E(j) > 0 Then 'если день рабочий
m = m + 1 'количество добавляемых рабочих дней
If m = 1 Then
Per = Ost + inD 'необходимая длительность в рабочих часах
Else 'для дополнительных дней
Per = Per - Ekes 'остаток длительности
End If
If E(j) < 24 Then 'если текущий рабочий день меньше суток
If inF = 1 Then 'если определяется начало работы
If Vid0 > 0 And n = 1 And KO <= Tn And KO >= 0 Then
'если в первый день планирования есть начальная настройка на вид работы
If Per < E(j) + Tn Then 'если перенос остатка меньше длительности первого рабочего дня
Calend = (j - 1) * 24 + Per ' начало работы
j = Delta 'конец цикла
End If
Else 'если нет начальной настройки
If Per < E(j) Then ' если перенос меньше длительности рабочего дня
Calend = (j - 1) * 24 + Per + Tn 'календарная длительность работы в часах
If j > 1 Then 'для дней после первого
If E(j - 1) = 24 Then 'если предыдущий рабочий день равен суткам
Calend = Calend - Tn 'календарная длительность работы в часах
End If
End If
j = Delta 'конец цикла
End If
Else 'если вычисляется окончание работы
...
Ekes = E(j) 'запоминание продолжительности текущего рабочего дня
Else 'если день нерабочий
If E(j - 1) = 24 Then
Per = Ost + inD 'необходимая длительность в рабочих часах
If Per <= Tn Then 'если перенос меньше длительности рабочего дня
Calend = (j - 1) * 24 + Per 'календарная длительность работы в часах
j = Delta 'конец цикла
End If
End If
End If
Next j

```

Рис. 4.7 Фрагмент средней части листинга функции *Calend()* для оди-  
ночной машины

работы на последующие дни. Если этот перенос меньше установленной продолжительности рабочего дня, то вычисляется момент выполнения всей работы в календарных часах, и цикл прекращается.

Функция *Calend()* использует разные неравенства прекращения цикла в зависимости от значения флага *inF*. В первом случае, когда *inF* = 1 и определяется начало выполнения работы *Per* должно быть строго меньше длительности рабочего дня. При вычислении конца работы *inF* = 2 и перенос *Per* может быть равен такой длительности.

Поскольку длительность текущего рабочего дня зависит от необходимости учета состояния машины в период от начала первого планируемого календарного дня до момента начала первой смены, программа сначала анализирует отличие настройки машины в первый день работы *Vid0* от нуля, а также приходится ли время освобождения машины на ночной период. В этом случае длительность первого рабочего дня составляет сумму планового рабочего дня *E(j)* и начала рабочего дня *Tn*. Значение самой функции *Calend()* определяется по величине переноса *Per* с учетом необходимых добавляемых дней *j*.

В случае, когда состояние машины в период от начала первого планируемого календарного дня до момента начала первой смены не должно учитываться, длительность рабочего дня равна  $E(j)$ , и значение функции  $Calend()$  увеличивается на начала рабочего дня  $Tn$ . Если расчет производится для дней после первого, а в предыдущем дне рабочий день равен суткам, то прибавление величины  $Tn$  отменяется.

Если значение переноса больше длительности рабочего дня, то эта длительность сначала запоминается в выражении  $Exes$ , а затем величина переноса соответственно уменьшается на следующем рабочем дне.

На рис. 4.8 приведен фрагмент нижней части листинга при круглосуточной работе. В верхней части рисунка определяется момент начала обработки (параметр  $inF = 1$ ) в случае, когда начальная настройка  $Vid0$  отлична от нуля.

Если момент начала не определен или определяется момент выполнения (параметр  $inF = 2$ ), программа продолжает вычисления. В этом случае длительность первого рабочего дня равна  $E(j)$ , а значение самой функции  $Calend()$  определяется по величине переноса  $Per$  с учетом необходимых добавляемых дней  $j$ . Обратим внимание на то, что величина  $Per$  представляет собой количество требующихся рабочих часов, начиная от момента начала текущего календарного дня, т.е. от 0 часов.

Если рассматриваются рабочие дни после первого дня, значение функции  $Calend()$  зависит от того, является предыдущий день рабочим или не рабочим. В случае рабочего дня разность переноса  $Per$  и момента начала рабочего дня  $Tn$  сравнивается с длительностью  $E(j)$ , в противном случае перенос  $Per$  непосредственно сравнивается с  $E(j)$ .

```

Flagg = 0
If inF = 1 And Vid0 > 0 And n = 1 And K0 <= Tn And K0 >= 0 Then
'если в первый день планирования есть начальная настройка на вид работы
  If Per < E(j) + Tn Then 'если перенос остатка меньше длительности первого рабочего дня
    Calend = (j - 1) * 24 + Per
    Flagg = 1
    j = Delta 'конец цикла
  End If
End If
If Flagg = 0 Then 'если функция не была определена выше
  If n > 1 Then 'для дней после первого
    If E(n - 1) = 0 Then 'если предыдущий день нерабочий
      If Per <= E(j) Then 'если перенос меньше длительности рабочего дня
        Calend = (j - 1) * 24 + Per + Tn 'календарная длительность работы в часах
        j = Delta 'конец цикла
      End If
    Else
      If Per - Tn <= E(j) Then 'если перенос меньше длительности рабочего дня
        Calend = (j - 1) * 24 + Per 'календарная длительность работы в часах
        j = Delta 'конец цикла
      End If
    End If
  Else 'для первого дня
    If Per - Tn <= E(j) Then 'если перенос меньше длительности рабочего дня
      Calend = (j - 1) * 24 + Per 'календарная длительность работы в часах
      j = Delta 'конец цикла
    End If
  End If
End If

```

Рис. 4.8 Фрагмент нижней части листинга функции  $Calend()$  для оди-  
ночной машины

В том случае, когда длительности всего графика работы недостаточно, функция *Calend()* выдает значение 0, что воспринимается системой как неудовлетворительная работа, и программа останавливается. С полным текстом функции *Calend()* можно ознакомиться, например, в макросе электронной книги *MBook1.xls*.

Поскольку в цехе используется несколько машин, их работа в течение выполнения расписания может отражаться двумя способами. Прежде всего, каждая машина может помечаться, как действующая или недействующая в течение всего времени расписания. Кроме того, непосредственно в расписании учитывается график нахождения машины в рабочем состоянии. При этом в календарном графике содержатся указания о днях планового ремонта и его продолжительности в часах.

На рис. 4.9 показан фрагмент функции *Calend()*, пригодной для применения нескольких машин. При вызове этой функции необходимо указать номер машины *inM*, для которой проводится расчет расписания.

Предварительно программа автоматически определяет содержание массива плановых ремонтов *NE(inM, j)* для каждой машины и каждого календарного дня в часах. Длительность рабочего дня определяется с учетом времени, затрачиваемого на плановый ремонт. Функ-

```
Function Calend(inBeg, inD, inM, inF) ' функция преобразования рабочей длительности в календарную
...
Calend = 0
n = 0
For j = n To Delta 'цикл по календарю
If E(j) > 0 Then 'если день рабочий
n = n + 1 'количество добавленных рабочих дней
If n = 1 Then
Per = Ost + inD 'необходимая длительность в рабочих часах
Else 'для дополнительных дней
Per = Per - Eнес 'остаток длительности
End If
If E(j) < 24 Then 'если текущий рабочий день меньше суток
If inF = 1 Then 'если определяется начало работы
If Vid0(inM) > 0 And n = 1 And K0(inM) <= Tn And K0(inM) >= 0 Then
'если в первый день планирования есть начальная настройка на вид работы
If Per < E(j) + Tn - NE(inM, j) Then 'если перенос остатка меньше длительности первого рабочего дня
Calend = (j - 1) * 24 + Per ' начало работы
j = Delta 'конец цикла
End If
Else 'если нет начальной настройки
If Per < E(j) - NE(inM, j) Then ' если перенос меньше длительности рабочего дня
Calend = (j - 1) * 24 + Per + Tn 'календарная длительность работы в часах
If j > 1 Then 'для дней после первого
If E(j - 1) = 24 Then 'если предыдущий рабочий день равен суткам
Calend = Calend - Tn 'календарная длительность работы в часах
End If
End If
j = Delta 'конец цикла
End If
End If
Else 'если вычисляется окончание работы
...
End If
Else 'если длительность рабочего дня равна суткам
...
End If
Eнес = E(j) - NE(inM, j) 'запоминание продолжительности текущего рабочего дня
End If
Next j
End Function
```

Рис. 4.9 Фрагмент листинга функции *Calend()* для нескольких машин

```

Function Calend(inBeg, inD, inM, inY) ' функция преобразования рабочей длительности в календарную
...
Calend = 0
n = 0
For j = n To Delta 'цикл по календарю
If E(j) > 0 Then 'если день рабочий
n = n + 1 'количество добавляемых рабочих дней
If n = 1 Then
Per = Oct + inD 'необходимая длительность в рабочих часах
Else 'для дополнительных дней
Per = Per - Ekes 'остаток длительности
End If
If E(j) < 24 Then 'если текущий рабочий день меньше суток
If inF = 1 Then 'если определяется начало работы
If Vido(inM) > 0 And n = 1 And KO(inM) <= To And KO(inM) >= 0 Then
'если в первый день планирования есть начальная настройка на вид работы
If Per < (E(j) - ME(inM, j)) * Application.Min(1, Ks(j)) + To Then
'если перенос остатка меньше длительности первого рабочего дня
Calend = (j - 1) * 24 + Per ' начало работы
j = Delta 'конец цикла
End If
Else 'если нет начальной настройки
If Per < (E(j) - ME(inM, j)) * Application.Min(1, Ks(j)) Then 'если перенос меньше длительности рабочего дня
Calend = (j - 1) * 24 + Per + To 'календарная длительность работы в часах
If j > 1 Then 'для дней после первого
If E(j - 1) = 24 Then 'если предыдущий рабочий день равен суткам
Calend = Calend - To 'календарная длительность работы в часах
End If
End If
j = Delta 'конец цикла
End If
End If
Else 'если вычисляется окончание работы
...
End If
End If
Ekes = (E(j) - ME(inM, j)) * Application.Min(1, Ks(j)) 'заполнение продолжительности текущего рабочего дня
End If
Next j
End Function

```

**Рис. 4.10** Фрагмент функции *Calend()* для нескольких машин с учетом коэффициента обеспеченности персоналом

ции *Calend()* для нескольких машин используется, например, в макросе электронной книги MBook4.xls.

Функция *Calend()* может быть использована для определения моментов выполнения работ с учетом коэффициента обеспеченности цеховым персоналом  $K_s$  (рис. 4.10). В этом случае фонд времени оборудования в цехе уменьшается в соответствии с величиной коэффициента  $K_s$ , меньшего единицы. Функция *Calend()* для этого случая используется в макросе электронной книги MBook6.xls.

## 4.5 Функция поступления работ на машину в рабочее время

Поступление материалов и заготовок на склад для выполнения работ возможно в любой момент, включая нерабочее время и праздничные дни. В то же время их подача на машину осуществляется только в рабочее время. Поэтому система использует функцию *Arrival()* для определения момента поступления работы на машину с учетом календарного графика, листинг которой приведен на рис. 4.11.

```

Function Arrival(inR) ' функция поступления работ на машину в рабочее время
Dim Ost As Single
If inR > 0 And Int(inR / 24) = inR / 24 Then 'если момент начала совпадает с моментом изменения даты
n = Int(inR / 24) 'количество полных календарных дней начала
Else
n = Int(inR / 24) + 1 'количество полных календарных дней начала
End If
Ost = inR - (n - 1) * 24 'момент прибытия в календарных часах в день прибытия
Arrival = 0 'прибытие равно 0
If Ost < (E(n) + Tn And E(n) > 0) Or E(n) = 24 Then 'если поступление приходится до окончания рабочего дня
Arrival = (n - 1) * 24 + Ost 'прибытием считается поступление работы в цех
Else 'поступление либо после рабочего дня, либо в нерабочий день
If n > 1 Then 'для дней после первого
If Ost < Tn And E(n - 1) = 24 Then 'если предыдущий рабочий день равен суткам
Arrival = (n - 1) * 24 + Ost 'момент прибытия в календарных часах в день прибытия
End If
End If
If Arrival = 0 Then 'если момент поступления еще не определен
For j = n + 1 To Delta 'цикл по календарю, начиная со следующего календарного дня после поступления
If E(j) > 0 Then 'если день рабочий
Arrival = (j - 1) * 24 + Tn 'прибытием считается момент начала нового рабочего дня
j = Delta 'конец цикла
End If
Next j
End If
End If
End Function

```

Рис. 4.11 Листинг функции *Arrival()*

При вызове функции указывается начальный момент выполнения работы в календарных часах *inR* в часах. В начале расчета рассчитывается количество полных календарных дней *n* начала выполнения плановой работы, отсчитывая от момента планирования, и момент прибытия на машину *Ost* в день начала выполнения работы. Если прибытие на склад происходит в нерабочее время, то в цикле по календарному графику определяются рабочие дни и моментом поступления на машину считается начало нового рабочего дня.

## 4.6 Функция числа рабочих часов в заданном календарном сроке

В задании на планирование срок выполнения работы, а также плановый срок поступления материалов и заготовок указываются в календарных часах, отсчитываемых от момента начала расписания. Для расчета загрузки необходимо пересчитывать эти данные в рабочие часы с учетом календарного графика работы. На рис. 4.12 приведен листинг соответствующей программы.

При вызове функции указывается заданный срок работы в календарных часах *inH* в часах. В начале расчета рассчитывается количество полных календарных дней *CDays* начала выполнения плановой работы, отсчитывая от момента планирования. Количество рабочих часов определяется как сумма времени полных рабочих дней от начала планирования и добавки *Ehex* в последнем рабочем дне. Эта добавка зависит от момента заданного срока, который имеет случайное значение и может быть больше рабочего времени, находиться в течение этого времени, а также быть меньше момента начала работы. Когда заданный срок приходится на нерабочий день, добавка *Ehex* равна нулю.

В случае круглосуточной работы рабочее время в первый плановый день отсчитывается от момента начала работы цеха. В программе полагается, что первый плановый день обязательно рабочий.

```

Function WorkHours(inH) 'функция числа рабочих часов в заданном календарном сроке
Dim CDays As Integer
'Первый плановый день обязательно рабочий
If inH > 0 And Int(inH / 24) = inH / 24 Then 'если момент выполнения совпадает с началом дня планирования
CDays = Int(inH / 24) 'количество полных календарных дней выполнения
Else
CDays = Int(inH / 24) + 1 'количество полных календарных дней выполнения
End If
WorkHours = 0
For j = 1 To CDays 'для всех дней до момента выполнения
If j > 1 Then
If j = 2 And E(1) = 24 Then
WorkHours = E(1) - Tn 'включение первого планового рабочего дня для круглосуточной работы
Else
WorkHours = WorkHours + E(j - 1) 'включение всех предыдущих рабочих дней
End If
End If
Next j
If E(CDays) > 0 Then 'если последний день рабочий
If E(CDays) = 24 Then 'при круглосуточной работе
If CDays = 1 Then 'в первый день
If inH > Tn Then 'если момент выполнения больше начала работы
Eчас = inH - Int(inH / 24) * 24 - Tn 'число часов добавки к суткам
Else
Eчас = 0
End If
Else
Eчас = inH - Int(inH / 24) * 24 'число часов добавки к суткам
End If
Else
If inH > Int(inH / 24) * 24 + Tn Then 'время выполнения больше начала рабочего дня
Eчас = inH - Int(inH / 24) * 24 - Tn 'число часов добавки к суткам
Else
'время выполнения меньше начала рабочего дня
Eчас = 0 'число часов рабочей добавки равно нулю
End If
If CDays > 1 Then
If E(CDays - 1) = 24 Then 'если предыдущий рабочий день круглосуточный
Eчас = inH - Int(inH / 24) * 24
End If
End If
...
End If
WorkHours = WorkHours + Eчас 'срок выполнения в рабочих часах от начала рабочего дня'
End Function

```

Рис. 4.12 Фрагмент листинга функции *WorkHours()*

## 4.7 Функция определения возможности начала непрерывного процесса

Если выполнение работы возможно только без ее прерываний, то необходимо проверять возможность начала процесса до истечения рабочего дня, или до имеющихся в календаре выходных дней. Фрагмент листинга верхней части программы приведен на рис. 4.13.

При вызове функции указывается начальный момент выполнения работы в календарных часах *inBeg* и длительность непрерывного выполнения работы *inD* в часах.

Как и в функции *Calend()*, в начале расчета рассчитывается количество полных календарных дней *n* начала выполнения плановой работы, отсчитывая от момента планирования. Наличие нерабочего дня фиксируется приданием флагу *Flag* значения, равного единице. Затем определяется остаток рабочих часов *Ost* в день начала выполнения работы. Величина этого остатка зависит от того, является ли рабочий день круглосуточным. Кроме того, на величину *Ost* влияет продолжительность предыдущего рабочего дня или наличие нерабочего дня.

```

Function Commence(inBeg, inD) ' функция возможного начала ветки дерева
Dim Per As Single 'перенос остатка
Dim Ost As Single 'остаток
If inBeg > 0 And Int(inBeg / 24) = inBeg / 24 Then 'если момент начала совпадает с моментом изменения даты
  n = Int(inBeg / 24) 'количество полных календарных дней начала
Else
  n = Int(inBeg / 24) + 1 'количество полных календарных дней начала
End If
Flag = 0 'флаг нерабочих дней
If n > 1 Then
  If E(n - 1) = 0 Then 'если предыдущий день нерабочий
    Flag = 1 'флаг наличия нерабочих дней
  End If
End If
If E(n) < 24 Then 'если длительность текущего рабочего дня меньше суток
  If Vid0 > 0 And n = 1 Then 'если в первый день есть начальная настройка на вид работы
    Ost = inBeg 'остаток рабочих часов равен исходному началу
  Else 'если нет начальной настройки, а также для других дней
    Ost = inBeg - Tn - (n - 1) * 24 'остаток рабочих часов в последний рабочий день начала
    If Ost < 0 Then 'остаток рабочих часов равен нулю
      Ost = 0
    End If
  End If
  If n > 1 Then 'для дней после первого
    If E(n - 1) = 24 Then 'если предыдущий рабочий день равен суткам
      Ost = inBeg - (n - 1) * 24 'остаток рабочих часов в последний рабочий день начала
    End If
  End If
Else 'если работа круглосуточная
  If Flag = 0 Then
    If n = 1 Then
      Ost = inBeg - K0 - (n - 1) * 24 'остаток рабочих часов в последний рабочий день начала
    Else
      Ost = inBeg - (n - 1) * 24 'остаток рабочих часов в последний рабочий день начала
    End If
  Else 'если предыдущий день нерабочий
    Ost = inBeg - Tn - (n - 1) * 24 'остаток рабочих часов в последний рабочий день начала
  End If
End If
...
End Function

```

Рис. 4.13 Фрагмент верхней части листинга функции *Commence()* для одиночной машины

В функции *Commence()* проводится анализ описанных вариантов. Для этого проверяется наличие первоначальной настройки *Vid0* в первый день нового планирования *n*. Полагается, что в случае, когда настройки машины на конкретный вид работы *Vid0* отлична от нуля, весь этот период является рабочим, и в таком случае остаток рабочих часов *Ost* равен начальному моменту расчета *inBeg*. В противном случае, если длительность текущего рабочего дня составляет меньше суток, остаток рабочих часов *Ost* должен отсчитываться от момента начала первой смены *Tn*.

Если продолжительность нового рабочего дня составляет 24 часа, величина остатка рабочих часов *Ost* равна начальному моменту расчета *inBeg* за вычетом количества времени прошедших дней. Если в первый день *Flag* предыдущего выходного дня равен 0, то величина *Ost* уменьшается на длительность до момента освобождения машины *K0*.

Если работа не является круглосуточной, начало работы в момент *inBeg* возможно, если величина *Per* меньше установленной продолжительности текущего рабочего дня *E(j)*. Если это условие не соблюдается, программа добавляет еще один рабочий день из календарного графика и очередная работа начинается с начала новой смены.

Значение возможного начала работы существенно зависит как от количества смен, так и от количества рабочих часов в каждую смену. При круглосуточной работе прерывание производ-

ства возможно в нерабочие дни, а также в период планового обслуживания машины. Вообще говоря, количество рабочих часов в каждой смене может варьироваться в самых различных случаях. Если длительность обработки  $inD$  не превышает суток, величину  $Per$  можно сравнивать с суммой полной длительности количества рабочих часов в календарный день начала выполнения работы  $E(j) + Tn$  и рабочего времени последующего рабочего дня  $E(j + 1)$ . Если это сравнение не выполняется, программа переносит начало выполнения работы на очередной рабочий день.

На рис. 4.14 приведен фрагмент нижней части листинга, относящийся к определению длительности окончания работы при круглосуточной работе. Для первого планируемого дня  $n$  значение самой функции  $Commence()$  определяется по величине остатка  $Ost$  с учетом необходимых добавляемых дней и моменту освобождения машины. В последующие дни значение функции определяется только остатком  $Ost$  с учетом необходимых добавляемых дней.

Независимо от числа смен, после выходных дней первая смена начинает работу в момент установленного начала работы цеха  $Tn$ . В случае необходимости нового включения машины учитывается время ее соответствующей подготовки  $Tr$ . При изменении вида работ на машине необходима ее переналадка. Полностью листинг программы  $Commence()$  приведен в программе  $MBook2.xls$ .

В случае использования функции  $Commence()$  при работе с несколькими машинами, для вызова этой функции необходимо указать номер машины  $inM$ . Такая функция содержится, например, в макросе электронной книги  $MBook5.xls$ .

```

If E(j) < 24 Then 'если рабочий день меньше суток
...
Else 'при круглосуточной работе
  If j > n + m - 1 Then 'если появился нерабочий день
    Flag = 1 'флаг нерабочего дня
  End If
  If Flag = 0 Then 'если предыдущий день рабочий
    If Per <= E(j) + Tn + E(j + 1) Then 'если перенос меньше длительности двух рабочих дней
      If n = 1 Then 'в первый день планирования учитывается остаток от предыдущей работы
        Commence = (j - 1) * 24 + Ost + K0 'календарная длительность начала работы в часах
      Else 'в последующие дни
        Commence = (j - 1) * 24 + Ost 'календарная длительность начала работы в часах
      End If
      j = Delta 'конец цикла
    End If
  Else 'если предыдущий день нерабочий
    If Per <= E(j) + Tn + E(j + 1) Then 'если перенос меньше длительности двух рабочих дней
      If n = 1 Then 'в первый день после выходного учитывается остаток от каждой текущей работы
        If inBeg <= (j - 1) * 24 + Tn Then 'если исходное начало работы меньше начало работы текущего дня
          Commence = (j - 1) * 24 + Tn + Tr 'возможное начало работы машины в часах
        Else
          Commence = (j - 1) * 24 + Ost + Tn 'календарная длительность начала работы в часах
        End If
      Else 'в последующие дни
        Commence = (j - 1) * 24 + Tn + Tr 'календарная длительность начала работы в часах
      End If
      j = Delta 'конец цикла
    End If
  End If
End If

```

Рис. 4.14 Фрагмент нижней части листинга функции  $Commence()$  для одиночной машины

## 4.8 Вспомогательные функции

### 4.8.1 Функция расчета времени выполнения программы

Для такого расчета вначале фиксируется момент запуска программы с помощью системной функции *Now()*, выдающей текущее время с точностью до секунды. В конце программы снова фиксируется момент этого выполнения, и определяется разница во времени с помощью функции *Duration()*, листинг которой приведен на рис. 4.15.

```
Function Duration(inD)
  Shift = InStr(inD, ":") 'выделение положения записи минут и секунд
  Temp = Right(inD, Len(inD) - Shift) 'запись минут и секунд
  Shift = InStr(Temp, ":") 'выделение секунд
  Duration = CInt(Left(Temp, Shift - 1)) * 60 'количество секунд в минутах
  Temp = Right(Temp, Len(Temp) - 3) 'запись секунд
  Duration = Duration + CInt(Temp)
End Function
```

Рис. 4.15 Листинг функции *Duration()*

При вызове функции *Duration()* указывается значение текущего времени (функции *Now()*), преобразованное в текстовый формат *inD* (например, 12.11.2015 09:12:30). Затем выделяется текстовая строка записи минут и секунд *Temp*. Эта строка делится на две части – минутную, которая умножается на 60, и секундную. Суммирование этих частей определяет выходное значение функции.

### 4.8.2 Функция определения полезности заказов в начале расчета

Значение полезности имеющейся совокупности заказов в начале планирования непосредственно на расчет расписания не влияет, но может использоваться в справочных целях. На рис. 4.16 приведен листинг фрагмента программы, в котором такая полезность определяется.

```
V0 = 0
For i = 1 To Beta 'расчет напряженности в узле 0'
  If d(i) <= Tn Then 'если дата выполнения меньше начала работы
    tNapr = tNapr + Napr2(W(i), p(i), d(i)) 'для просроченных заказов
  Else
    tNapr = tNapr + Napr1(W(i), p(i), d(i)) 'для не просроченных заказов
  End If
  V0 = V0 + p(i) / G 'накопление начальной трудоемкости
Next i
V0 = V0 - tNapr 'суммарная полезность заказов в корне дерева
```

Рис. 4.16 Листинг начальной полезности заказов

Напряженность для просроченных и непросроченных заказов рассчитывается по различным формулам, для которых используются 2 различные функции *Napr2()* и *Napr1()*, приведенные на рис. 4.17.

При вызове функций *Napr1()* и *Napr2()* для каждой строки работ (заказов) используются текущие значения коэффициентов приоритета *snW*, трудоемкости работы *snP*, требуемого момента выполнения *snD*.

```

Function Napr1(snW, snP, snD) As Single      'напряженность с резервом времени'
    Napr1 = snW * snP / G / ((snD - Tn) / a / G + 1)
End Function
-----
Function Napr2(snW, snP, snD) As Single      'напряженность без резерва времени'
    Napr2 = snW * snP / G * ((Tn - snD) / a / G + 1)
End Function

```

Рис. 4.17 Листинг функций *Napr1()* и *Napr2()*

### 4.8.3 Функция поиска строки в списке по известному номеру работы

Иногда для работы программы необходимо определить номер текущей строки в списке работ по ее известному номеру. На рис. 4.18 приведен листинг такой функции.

```

Function Determ(inBeta, inn)
    For i = 1 To inBeta
        If des(i) = inn Then
            Determ = i
            i = inBeta
        End If
    Next i
End Function

```

Рис. 4.18 Листинг функции *Determ()*

При вызове функции *Determ()* указывается полное число строк в списке *inBeta* и номер работы *inn*. Номер соответствующей строки устанавливается путем последовательного перебора строк вплоть до указанного номера работы.

## 4.9 Функции графического отображения результатов планирования

Основным способом графического изображения результатов планирования является диаграмма Ганта. На этой диаграмме для каждой машины показывается ее загрузка во времени последовательностью выполняемых работ. Перед построением диаграммы Ганта рекомендуется удалять с листа таблицы предыдущих построений, если они там имеются.

Построение диаграммы Ганта в автоматическом режиме осуществляется за несколько этапов. На первом этапе по выбранному варианту расписания строятся массивы начала и конца каждой работы. На рис. 4.19 приведен листинг фрагмента основной программы, в котором частично записан этот процесс.

Двумерный массив *GrMass()* состоит из четырех столбцов. В первом столбце записываются моменты начала и конца работы в рабочих часах; во втором – соответствующие номера работ, в третьем столбце записывается цифра 1, указывающая на загрузку машины, или цифра 0, соответствующая простаиванию. Четвертый столбец может использоваться в справочных целях для записи трудоемкости текущей работы.

На втором этапе массивы *GrMass()* выводятся на лист MS Excel с помощью формы «Координаты для диаграммы». Связь между листом MS Excel и формой «Координаты для диаграммы» поддерживается с помощью подпрограмм-функций, показанных на рис. 4.20 и рис. 4.21.

```

i = i + 1
GrMass(i, 1) = Round(Ехес, 1) 'Запись в массив момента начала работы'
GrMass(i, 2) = Job 'Запись номера работы в массив
GrMass(i, 3) = 0 '0 на диаграмме Ганта
i = i + 1
GrMass(i, 1) = Round(Ехес, 1) 'Запись в массив момента начала работы'
GrMass(i, 2) = Job 'Запись номера работы в массив
GrMass(i, 3) = 1 '1 на диаграмме Ганта
l = m 'Напоминание номера работы
i = i + 1
GrMass(i, 1) = Round(Ехес, 1) 'Запись в массив момента конца работы'
GrMass(i, 2) = Job
GrMass(i, 3) = 1 '1 на диаграмме Ганта
i = i + 1
GrMass(i, 1) = Round(Ехес, 1) 'Запись в массив момента конца работы'
GrMass(i, 2) = Job
GrMass(i, 3) = 0 '0 на диаграмме Ганта

```

Рис. 4.19 Листинг фрагмента массивов начала и конца каждой работы

Непосредственное построение диаграммы производится при помощи программного модуля на форме «Построение диаграммы». Модули форм «Координаты для диаграммы» и «Построение диаграммы» связаны при помощи функций, аналогичных показанным на рис. 4.20 и 4.21.

Основной этап построения диаграммы начинается с объявления объекта Private Diag As Chart в качестве диаграммы в рабочей книге (рис. 4.22).

В первых двух строках листинга на рис. 4.22 описывается источник данных для построения диаграммы как область на листе MsExcel. Как было отмечено выше, обращение к этому листу из формы «Построение диаграммы» обеспечивается с помощью функций, листинги которых показаны на рис. 4.20 и 4.21. В следующих строках устанавливаются параметры диаграммы, единицы измерения осей, границы рисунка и т.п.

Затем проводится цикл по всему набору работ *Jobs*. В рамках цикла в диаграмму включаются надписи с номерами работ (подписи точек) и определяется время длительность интервала каждой работы *Lng*. Если переключатель *CheckBox1* нажат, то происходит построение прямоугольников *Quad*, описывающих период загрузки машины.

```

'Sender листа'
Private Sub SendSheet(ByRef Sheet As Worksheet)
    Call Graph_Points.GetSheet(Sheet) 'передача листа на форму управления графиком
End Sub

```

Рис. 4.20 Листинг функции *SendSheet()*

```

'Getter листа'
Public Sub GetSheet(ByRef Sheet As Worksheet)
    Set InstSheet = Sheet
End Sub

```

Рис. 4.21 Листинг функции *GetSheet()*

```

With Diag
.SetSourceData Source:=InstSheet.Range(InstSheet.Cells(Alfa + 2, Gamma + 2), _
InstSheet.Cells(Alfa + 2 + CellCnt, Gamma + 2)) 'Создание диаграммы и задание области ячеек для диаграммы (1-ый ряд)
.ChartType = xlXYScatterLinesNoMarkers 'Задание типа диаграммы (линейчатая без маркеров)
.Name = "Диаграмма Ганта" 'Название листа с диаграммой
.BarTitle = True 'Вывод названия диаграммы
.ChartTitle.Text = "Диаграмма Ганта" 'Название диаграммы
.HasLegend = False 'Скрытие легенды
.Axes(xlCategory).HasTitle = True 'Вывод названия оси ОХ
.Axes(xlCategory).AxisTitle.Text = _
"Время работы, часы" 'Присвоение названия оси ОХ
.Axes(xlValue).HasMajorGridlines = False 'Убрать основные горизонтальные линии
.Axes(xlValue).HasMinorGridlines = False 'Убрать побочные горизонтальные линии
.Axes(xlValue).MajorUnit = 1 'Определение размерности делений по оси ОУ
.Axes(xlValue).MaximumScale = 10 'Максимальное значение по оси ОУ
.Axes(xlValue).MinimumScale = 0
.Axes(xlValue).Border.LineStyle = xlNone
.Axes(xlValue).TickLabelPosition = xlNone
For i = 1 To JobC
.SeriesCollection(1).Points(4 * i - 1).ApplyDataLabels 'Включить подписи точек макс
.SeriesCollection(1).Points(4 * i - 1).DataLabel.Characters.Text = _
InstSheet.Cells(Alfa - 1 + 4 * i, Gamma).Value 'Вывод в работы в точках макс
'Настройка текста работ
TBegin = InstSheet.Cells(Alfa + 4 * i, Gamma + 2).Value 'Время начала работы
Lng = InstSheet.Cells(Alfa + 4 * i + 1, Gamma + 2).Value 'Время окончания работы
Lng = Lng - TBegin 'Длительность работы
If CheckBox1.Value Then
Set Quad = .Shapes.AddShape(msoShapeRectangle, 10 + TBegin * QuadScale, QuadHeight, Lng * QuadScale, 38) 'Создание прямоуго
ColorRGB = GetJobType(InstSheet.Cells(Alfa + 2 + 4 * i - 3, Gamma).Value) 'Выбор цвет вида работы
Quad.Fill.ForeColor.RGB = ColorRGB 'Задать цветом прямоугольнику
End If
Next i
If Application.Version = "15.0" Or Application.Version = "16.0" Then
.SeriesCollection(1).LeaderLines.Format.Line.Visible = msoFalse 'Убрать линии взаимоси
End If
Call JobTypeLegend(10, 40) 'Добавить легенду
.Export Filename:=ActiveWorkbook.Path & "\" & DiagFileName, FilterName:="JPG" 'Экспортирование диаграммы в файл картинок
End With

```

Рис. 4.22 Листинг основного фрагмента построения диаграммы Ганта

Каждой работе соответствует вид работы, определяющий настройку ее оснастки. В диаграммах Ганта, используемых в настоящей книге, для визуализации каждого вида работы используется отдельный цвет. Такой подход обеспечивает наглядность группирования работ по видам. В программе выбирается цвет вида работы *ColorRGB* и затем проводится заливка прямоугольников соответствующими цветами.

В конце построения в верхнюю часть диаграммы вставляется цветовая легенда видов работ, готовая диаграммы экспортируется в файл изображения, которое затем загружается на форму «Построение диаграммы».

# Построение расписания для одиночной машины с последовательным выполнением работ

5.1 Введение.....	73	5.6 Листинг основной части программы.....	83
5.2 Исходные данные для группового последовательного выполнения работ на одиночной машине.....	75	5.7 Перепланирование расписания.....	92
5.3 Работа с программой.....	76	5.8 Моделирование расписания.....	97
5.4 Анализ результатов планирования.....	79	5.9 График загрузки и критический горизонт планирования..	98
5.5 Блок-схема программы.....	81	5.10 Планирование и перепланирование при выполнении работ с большой длительностью.....	101

## 5.1 Введение

Если каждая выполняемая работа может быть полностью выполнена на одной из имеющихся машин, такая задача планирования называется одностадийной. В наиболее простом случае производственная система состоит из одной машины, на которой должны выполняться все планируемые работы. Расписание для такой машины представляет собой последовательность выполнения уже поступивших работ, а также работ, которые могут поступить в некотором ближайшем будущем.

Исходные данные для составления расписания настоящей задачи записываются на листе MS Excel электронной книги MBook1.xls. Эта книга в состоянии поставки состоит из семи листов, на которых иллюстрируются различные аспекты составления расписаний.

На листе 1 в табл.  $A4:G8$  находится простейшее задание (рис. 5.1), состоящее из пяти работ трех различных видов. В каждой строке задания описываются параметры работ: номер работы; трудоемкость в нормочасах; требуемый момент готовности в календарных часах; ожидаемый момент поступления заготовки в календарных часах; вид работы; весовой коэффициент работы и выполнение работы в процентах. Целесообразно записывать работы в порядке возрастания требуемых дат их выполнения.

Моменты готовности и поступления работ отсчитываются от момента наступления календарного дня, являющегося первым в расписании. Под видом работы понимается, например, конструкторское обозначение детали, или другой параметр работы, вызывающий необходимость в переналадке машины. Весовой коэффициент работы, вообще говоря, отличается от часто используемого коэффициента приоритета, который непосредственно устанавливает очередность работы. С увеличением весового коэффициента по сравнению с единицей, программа пытается не просто уменьшить срок выполнения соответствующей работы, а выполнить эту

работу в точно установленный срок. В тех случаях, когда такой срок уже пройден, весовой коэффициент превращается в коэффициент приоритета.

Применение технологического группирования работ обеспечивает небольшую трудоемкость перехода от одной работы к другой внутри группы. Если, например, на одной машине должна последовательно проводиться группа из нескольких работ (заказов) по изготовлению одного и того же продукта, то время переналадки между этими работами равно нулю, и вся группа таких заказов превращается в одну партию изготовления. Такой вид группирования характерен для оборудования, применяемого для резки, штамповки, отливки деталей из пластмасс и т.п.

Кроме того, если в технологическом процессе имеется машина, которая является узким местом, расписание для этой машины является основой для планирования всего процесса. Такая машина может рассматриваться как одиночная и для нее целесообразно проведение группового планирования.

Для оптимизации расписания одиночной машины в описанном варианте постановки могут использоваться различные критерии, описанные в п. 1.5, за исключением критерия *Stax*, определяемого по полному времени завершения всего объема запланированных работ, т.к. это время просто равно сумме трудоемкостей всех работ.

В литературе описывается большое количество различных задач для одиночной машины при последовательном выполнении работ. Не претендуя на полноту этого перечня, приведем некоторые основные задачи таких расписаний.

- Расписание с наименьшим количеством запаздывающих работ.
- Расписание с минимизацией суммы взвешенных запаздываний каждой работы.
- Расписание, учитывающее как поздние, так и ранние отклонения от срока.
- Расписание с общими датами отгрузки для различных работ.
- Расписание с подбором оптимальной даты отгрузки.
- Расписание для случая, когда часть работ имеет заданный порядок следования.
- Расписания для работ, прибывающих в различное время.
- Расписания при учете трудоемкости переналадки.
- Периодические расписания с партиями экономичного размера.

Подробнее с этими задачами можно ознакомиться в книге [Мауэрграуз, 2012], там же упоминается соответствующая литература. В настоящей главе описывается относительно простая задача составления расписания для одной машины при последовательном выполнении работ  $r_i$ , прибытие которых запланировано в различное время. При этом учитывается как необходимость своевременного завершения каждой работы с заданным сроком выполнения  $d_i$ , так и экономия затрат на переналадку машины.

Положим, что для обработки на машину в любой последовательности поступают работы, относящиеся к одному из  $S$  различных видов, причем длительность переналадок  $s_{fq}$  с вида  $q$  на другой вид зависит от их порядка, простаивание машины при наличии работ возможно, но вызывает дополнительные затраты. Если используются критерии  $U$ ,  $\bar{V}$ , описанные в п.п. 3.4.2 и 3.4.1, эта рассматриваемая задача имеет вид

$$1|r_i, d_i, s_{fq}|U, \bar{V}. \quad (5.1)$$

Для расчета расписания используется компьютерная программа на основе функций полезности, описанных выше в главе 3. Программа представляет собой макрос на языке VBA для электронной книги MS Excel. Рабочее задание записывается на листе MS Excel; после выполнения программы результат записывается этом же листе и на формах книги.

## 5.2 Исходные данные для группового последовательного выполнения работ на одиночной машине

Исходные данные для составления расписания настоящей задачи записываются на листе MS Excel электронной книги MBook1.xls. Эта книга в состоянии поставки состоит из семи листов, на которых иллюстрируются различные аспекты составления расписаний.

На листе 1 в табл. \$A\$4:\$G\$8 находится простейшее задание (рис. 5.1), состоящее из пяти работ трех различных видов. В каждой строке задания описываются параметры работ: номер работы; трудоемкость в нормочасах; требуемый момент готовности в календарных часах; ожидаемый момент поступления заготовки в календарных часах; вид работы; весовой коэффициент работы и выполнение работы в процентах. Целесообразно записывать работы в порядке возрастания требуемых дат их выполнения.

Моменты готовности и поступления работ отсчитываются от момента наступления календарного дня, являющегося первым в расписании. Под видом работы понимается, например, конструкторское обозначение детали, или другой параметр работы, вызывающий необходимость в переналадке машины. Весовой коэффициент работы, вообще говоря, отличается от часто используемого коэффициента приоритета, который непосредственно устанавливает очередность работы. С увеличением весового коэффициента по сравнению с единицей, программа пытается не просто уменьшить срок выполнения соответствующей работы, а выполнить эту работу в точно установленный срок. В тех случаях, когда такой срок уже пройден, весовой коэффициент превращается в коэффициент приоритета.

Значения основных параметров процесса планирования записываются во второй строке листа. Отметим важность параметров «Первоначальная настройка машины» в ячейке \$H\$2 и параметра «Количество рабочих смен», записанного в ячейке \$L\$2. В данном примере начальная настройка машина соответствует виду 3, количество смен равно 1.

В табл. \$K\$5:\$M\$7 приведены нормы времени в часах на переналадку машины с одного вида работы на другой. При этом полагается, что номер предыдущего вида работы устанавливается по столбцу таблицы, а номер последующего вида работы – по строке таблицы. В табл. \$M\$20:\$X\$22 описан календарный график работы машины по дням, начинающийся с первого дня выполнения составляемого расписания. Для каждой смены календарного дня проставлено количество рабочих часов.

В первой строке записываются параметры обработки данных и записи результатов планирования. Данные в таблице задания и нормы времени можно изменять до начала планирования

№ работы	Трудоемкость работы, н/час	Требуемый момент готовности, календ. часы	Ожидаемый момент поступления, календ. часы	Вид работы	Весовой коэффициент	Выполнение, %
1	1	3	-4	1	5	0
2	2	10	0	2	1	0
3	1	15	9	1	1	0
4	2	12	8	3	1	0
5	1	24	10	1	1	0

Рис. 5.1 Исходное задание на листе 1

путем непосредственного ввода их значений в ячейки листа электронной таблицы. Значениями параметров следует управлять в процессе планирования с помощью форм.

В данном примере работа 1 к моменту начала рабочего дня, равного 8 часов, является просроченной и для срочного выполнения в таблице на рис. 5.1 предусмотрен значительный весовой коэффициент 5.

Работа программы целиком основана на методе планирования по критериям издержек  $U$  и средней полезности выполнения заказов  $\bar{V}$ , изложенных в п. 3.4.2 и п. 3.4.1. Результаты планирования записываются на рабочем листе электронной книги в виде нескольких возможных вариантов.

В каждом из этих вариантов совокупность значений  $U$ ,  $\bar{V}$ , не является доминирующей по отношению к совокупности этих величин для любого другого варианта. Это означает, что, если, например, для первого варианта величина  $U$  лучше (меньше), чем для второго, то одновременно величина  $\bar{V}$  для первого варианта обязательно хуже (меньше), чем для сравниваемого второго варианта.

На листе 2 приведен пример задания для 20 работ семи различных видов, а на листе 3 – возможный вариант перепланирования этого задания. На листе 4 находится задание для 40 работ с двенадцатью возможными видами работ для случая, когда все работы в начальный момент обработки являются доступными. Для этого примера проводится моделирование по различным параметрам. На листе 5 приведен пример моделирования 30 работ с целью нахождения рационального горизонта планирования. На листе 6 показан случай пяти работ с большой трудоемкостью, на листе 7 приведен результаты перепланирования такого набора работ.

### 5.3 Работа с программой

Для работы с программой планирования в MS Excel устанавливается соответствующий рабочий лист, например, лист 1 и осуществляется команда Макросы/Utility1/Выполнить. При нажатии кнопки «Запуск программа» программа начинает работать. При выборе опции «без моделирования», система сообщает о последней дате планирования (рис. 5.2) и предлагает одну из двух возможностей – подготовку планирования с новой датой или повторение расчета с последней датой.

В этом параграфе рассмотрим вариант расчета расписания без перехода на новую дату, при котором открывается форма «Ввод данных» (рис. 5.3). В верхнем ряду окон формы (рис. 5.3) задаются основные параметры процесса. Психологический коэффициент  $\alpha$  – это коэффициент настройки для конкретного предприятия, отражающий степень «благодушия» при имеющихся

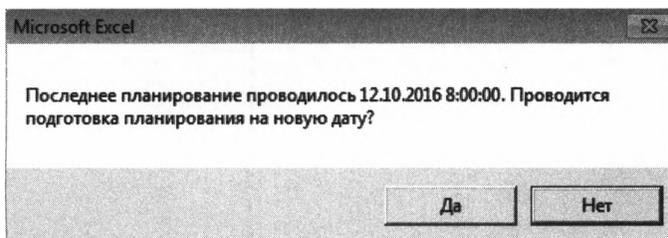


Рис. 5.2 Выбор варианта расчета расписания

запасах времени или «нервозности» при срыве сроков производства (п. 3.1). Рекомендуемые значения этого коэффициента находятся в пределах 0,03 – 0,1.

Длительность планового периода должна устанавливаться с учетом количества рабочих часов в день с тем, чтобы полное количество рабочих часов в течение планового периода было сравнимо с суммарной трудоемкостью всех работ в задании. Например, при 8-часовом рабочем дне для задания на листе 1 целесообразно установить 3-дневный плановый период. Стоимости рабочей смены, нормочаса наладки и часа простоя должны устанавливаться в текущем денежном выражении.

Результат планирования существенно зависит от вида работ, на который машина настроена в начальный момент выполнения задания. Это значение обязательно должно вводиться в момент планирования.

В окнах второго ряда формы вводятся имена ячеек, описывающих таблицу задания и таблицу норм времени и таблицу календаря. Имена вводятся в виде латинской буквы (столбца) и числа (строки) без знаков \$, например L5. Первой считается крайняя верхняя ячейка слева, последней – крайняя нижняя ячейка справа. При этом ячейки с номерами видов работ в таблице норм времени переналадки не учитываются.

В первом окне третьего ряда записывается имя ячейки, в которую помещается начало вывода результата планирования. Целесообразно в качестве такой ячейки выбирать ячейку, находящуюся несколько ниже от ячеек задания в левой части листа. Далее в третьем ряду записываются начальная настройка машины на момент начала выполнения расписания, календарный момент начала рабочего дня, момент освобождения машины от текущих работ и дата начала расписания. В данном примере момент освобождения машины принят равным 10 часов первого дня, для которого составляется расписание.

При первоначальном вызове формы «Ввод данных» значения данных в окнах могут быть пустыми. Для вызова данных с листа на экран используется кнопка «Текущие параметры». Измененные данные обязательно должны быть записаны на лист с помощью кнопки «Ввод данных в Excel».

Система автоматически рассчитывает загрузку машины и выдает соответствующее сообщение (рис. 5.4). По окончании расчета все возможные и не доминируемые варианты выводятся на экран (рис. 5.5).

В каждом варианте работы сгруппированы по видам, а группы разделены пробелами. Внутри группы последовательность работ не обязательно совпадает с порядком их номеров, поскольку

Рис. 5.3 Форма ввода параметров задачи (данные для листа 1)

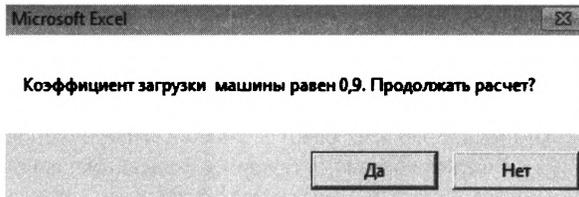


Рис. 5.4 Сообщение о текущей загрузке машины.

**Недоминируемые варианты**

Вариант 1: 1, 2, 4, 3,5

Вариант 2: 4, 1,3,5, 2

Рис. 5.5 Результаты работы программы на листе 1

работы в одной группе могут иметь различную трудоемкость. Если резерв времени выполнения всех работ в одной группе положительный, то система иногда рекомендует выполнять сначала работы с меньшей трудоемкостью с тем, чтобы понизить суммарную длительность производственного цикла. Наоборот, если часть работ в группе просрочена, система может рекомендовать вначале выполнить работу с большей трудоемкостью, чтобы понизить возможные штрафные функции за просрочку.

В рассматриваемом примере в первом варианте расписания вначале выполняется работа 1, которая относится к виду 1, не совпадающему с видом начальной настройки машины, затем выполняются работы 2 и 4, и в конце расписания запланирована группа из двух работ 3 и 5. Во втором варианте первой выполняется работа 4 вида 3, на который система была первоначально настроена. Затем запланирована группа из трех работ 1,3,5 одного вида 1, и в конце расписания – работа 2. Как видно из рис. 5.5, расписание автоматически предлагает либо немедленный переход к запаздывающей работе 1, либо вариант с малой трудоемкостью переналадок.

Время работы существенно зависит от количества работ в задании. При пяти работах в задании время работы составляет несколько секунд, при пятидесяти работах время выполнения программы может достигнуть одной минуты.

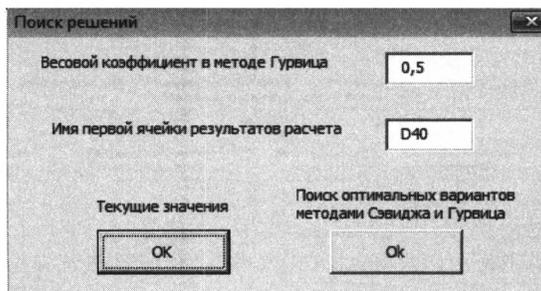


Рис. 5.6 Форма поиска решений

Дальнейшая работа пользователя заключается в выборе из предлагаемого набора одного варианта, наиболее рационального с точки зрения пользователя. Для этого система выводит на экран форму «Принятие решений» (рис. 5.6). Для определения рекомендуемых решений в программе используются методы принятия решений Сэвиджа и Гурвица [Мауэргауз, 2012]. Для расчета по последнему требуется указать весовой коэффициент метода Гурвица, причем обычно этот коэффициент находится в пределах 0,3 – 0,7. В последнем окне формы записывается имя ячейки, в которую помещается начало вывода результата расчетов по Сэвиджу и Гурвицу.

При первоначальном вызове формы «Принятие решений» значения данных в окнах могут быть пустыми. Для вызова данных с листа на экран используется кнопка «Текущие значения». Кнопка «Поиск оптимальных вариантов . . . » служит для запуска соответствующей программы.

По окончании расчета на экран выводятся номера вариантов, рекомендуемые в соответствии с методами Сэвиджа и Гурвица. Кроме того, для всех не доминируемых вариантов выводятся данные о значениях критериев  $U$ ,  $\bar{V}$  (рис. 5.7), а также значения коэффициентов группирования  $K_g$  и запаздывания  $K_z$ , полной длительности выполнения расписания  $Сmax$ , среднего  $T_c$  и наибольшего  $Tmax$  запаздываний. Величина коэффициента группирования определяется формулой 2.1, коэффициента запаздывания – формулой 2.3. Для упрощения вывода символов на лист MS Excel, символ  $\bar{V}$  на рис. 5.6 заменен символом  $V$ .

Коэффициент плановой загрузки: 0,9  
 Рекомендуемые варианты: по методу Сэвиджа - вариант 1, по методу Гурвица - вариант 1  
 Показатели вариантов расписания:  
 относительные затраты на наладку набора работ  $U$ ; средняя полезность заказов  $V$ ; коэффициент группирования  $K_g$ ; коэффициент запаздывания  $K_z$ ;  
 полная длительность выполнения  $Сmax$ , среднее  $T_c$  и наибольшее  $Tmax$  запаздывания в календарных часах  
 Начальные значения критериев:  $U = 0$ ;  $V = -0,443$   
 Вариант 1:  $U = 1,975$ ;  $V = -0,219$ ;  $K_g = 1,25$ ;  $K_z = 1$ ;  $Сmax = 35$ ;  $T_c = 8,8$ ;  $Tmax = 19$   
 Вариант 2:  $U = 1,2$ ;  $V = -0,278$ ;  $K_g = 2,5$ ;  $K_z = 0,4$ ;  $Сmax = 33$ ;  $T_c = 6,4$ ;  $Tmax = 23$

Рис. 5.7 Значения показателей расписания для различных вариантов

## 5.4 Анализ результатов планирования

Необходимость такого анализа может возникнуть, прежде всего, в случаях, когда в результате расчетов по методам Сэвиджа и Гурвица предлагаются разные варианты плана. Кроме того, расчеты по этим методам могут и не дать результата, который удовлетворит пользователя. В общем случае, при значительной нагрузке – с  $Kw=0,8$  и более, имеет смысл выбирать вариант с большим коэффициентом группирования  $K_g$ . При малой нагрузке целесообразно использовать вариант с высокой полезностью  $\bar{V}$ .

Анализ можно провести, изучая выведенные данные о значениях  $U$ ,  $\bar{V}$  для установленного расчетного горизонта. Если расчетом установлено, что существует вариант, при котором величина  $\bar{V}$  не слишком отличается от наибольшего возможного значения, а при этом величина  $U$  значительно меньше максимума, то такое решение является целесообразным.

Для расчета плана по анализируемому варианту система предлагает форму «Расчет плана» (рис. 5.8). В окне «Номер варианта» этой формы следует ввести номер рассчитываемого варианта. В окне «Имя первой ячейки результата» указывается имя ячейки, в которой целесообразно разместить расчет плана для дальнейшего изучения.

При расчете плана (рис. 5.9) учитываются моменты поступления работ, их продолжительность, нормы времени на переналадку и рабочий календарь. Число без скобок соответствует планируемому моменту начала работы в календарных часах, отсчитываемых от начала пер-

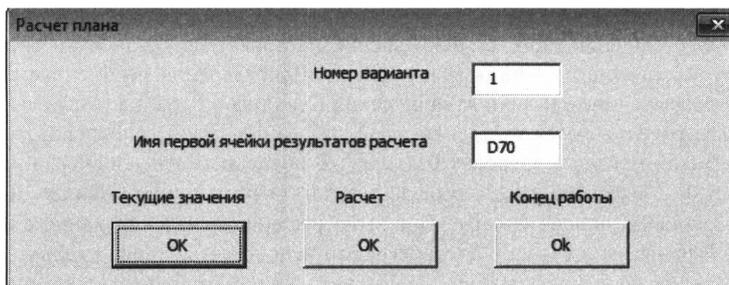


Рис. 5.8 Форма расчета плана

вых суток выполняемого расписания. Соответствующий номер работы затем записывается в скобках, после скобок записывается момент окончания работы в календарных часах.

При первоначальном вызове формы «Расчет плана» значения данных в окнах могут быть пустыми. Для вызова данных с листа на экран используется кнопка «Текущие значения». Для выбранного варианта плана указывается номер ячейки.

В данном случае для выполнения работы 1, имеющей вид 1, в момент освобождения машины, настроенной ранее на вид 3, необходима начальная переналадка длительностью 1 час. Следующая работа 2 также требует переналадки, начинается в 11 часов и заканчивается в 13 часов. После этого производится переналадка на работу 4 вида 3, которая заканчивается в 16 часов, т.е. в конце рабочего дня. На следующий день производится переналадка на работу 3 вида 1, после которой работа 5 выполняется без переналадки. Расписание заканчивается в момент 35 календарных часов от начала планирования (т.е. 11 часов следующего рабочего дня).

При проведении расчетов нескольких вариантов плана, полученные результаты можно размещать в различных ячейках. Для окончания расчета используется кнопка «Конец работы».

План обработки по варианту 1 в календарных часах  
9 (1) 10; 11 (2) 13; 14 (4) 16; 33 (3) 34; 34 (5) 35;

Рис. 5.9 План обработки

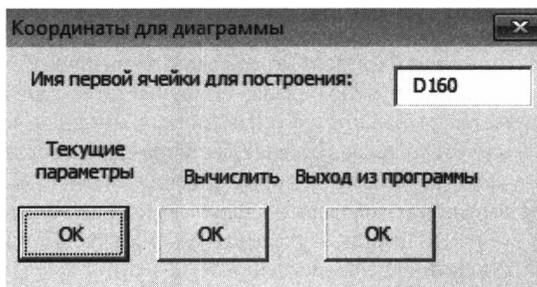


Рис. 5.10 Форма для указания размещения данных диаграммы

Система обеспечивает вывод расписания работы машины в виде диаграммы Ганта. Для этого сначала необходимо указывать номер ячейки, в которой размещаются результаты расчета координат диаграммы (рис. 5.10.)

Перед построением диаграммы Ганта рекомендуется удалять с листа таблицы предыдущих построений, если они там имеются.

Диаграмма Ганта строится на форме «Построение диаграммы» (рис. 5.11), ее график показан на рис. 5.12. В нижней части рис. 5.12 помещена сама диаграмма, представляющая собой график загрузки машины во времени в рабочих часах (без учета необходимых календарных перерывов). Отсчет рабочего времени на диаграмме производится от момента начала первого рабочего дня.

В верхней части помещается т.н. «легенда», в которой каждый вид работ описывается соответствующим цветом. Программа предусматривает легенду из 12 возможных цветов (видов работы), фактически в данном примере используются 3 вида работ. Из диаграммы наглядно видно, как происходит группирование – работы 3 и 5 первого вида закрашены одинаковым цветом, и в результате работа 5 может выполняться непосредственно после работы 3 без дополнительных переналадок. В то же время работа 1, которая также относится к виду 1, выполняется в начале расписания.

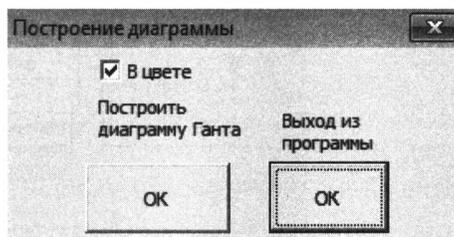


Рис. 5.11 Форма построения диаграммы

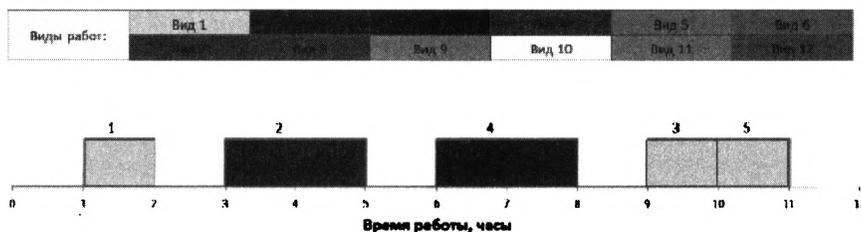


Рис. 5.12 Диаграмма Ганта

## 5.5 Блок-схема программы

Блок-схема (рис. 5.13), может быть условно поделена на 4 основные части: ввод исходных данных и массивов (блоки 1, 2); определение недоминируемых узлов первого уровня (блоки 3, 4, 5); определение недоминируемых узлов на последующих уровнях (блоки 6 – 12); вывод расписания (блоки 13, 14, 15).

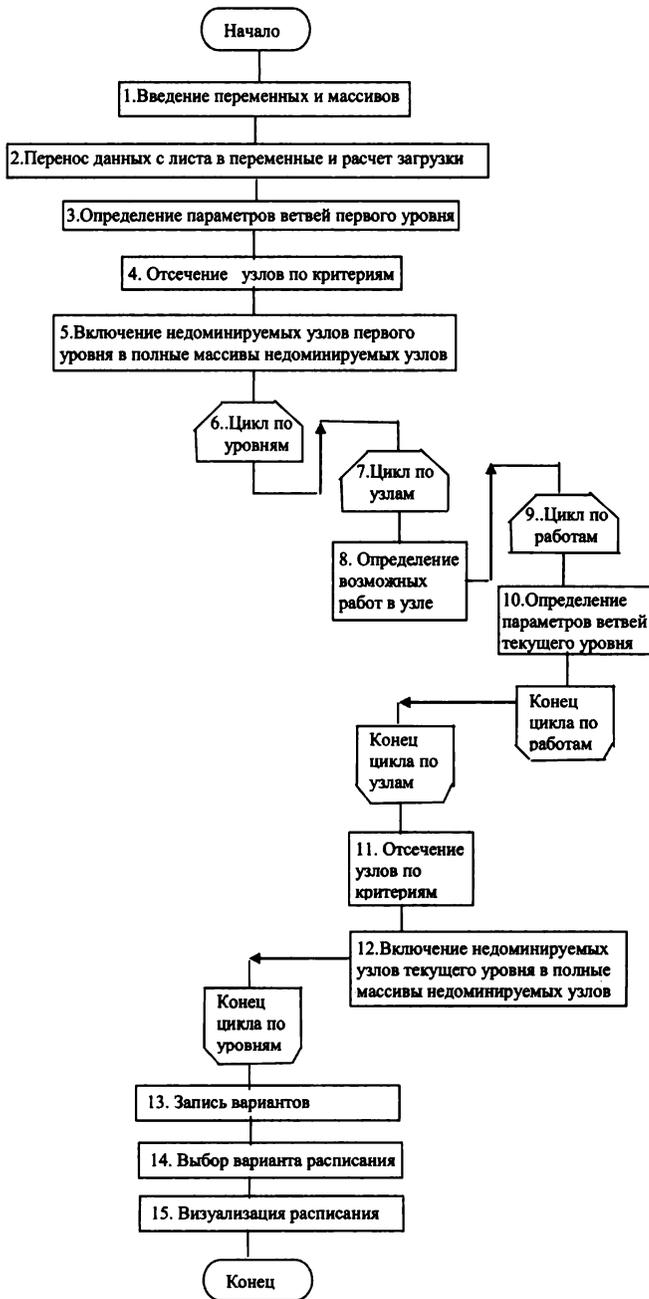


Рис. 5.13 Блок-схема программы

## 5.6 Листинг основной части программы

На рисунках ниже приведены отдельные компоненты листинга программы. На рис. 5.14 описаны данные о переменных и массивах, действующих по всей программе

На каждом уровне построения дерева расписания используются 6 основных массивов: *UStage()*, *VStage()*, *ParStage()*, *CompStage()*, *NPStage()* и *Tk()*, в которых записываются параметры всех узлов этого уровня. Массивы *U()*, *V()*, *Par()*, *Comp()*, *NP()* и *Commen()* используются для дальнейшего построения ветвей дерева путем перезаписи значений параметров недоминируемых узлов, остающихся после отсечения.

Ниже глобальных переменных в программе описывается ряд вспомогательных локальных переменных и затем вызывается форма ввода параметров (рис. 5.3). Программа автоматически проверяется правильность размещения данных на листе. Программа автоматически переносит данные с листа в переменные и массивы (блок 2 на рис. 5.13). В качестве примера на рис. 5.15 приведен компонент программы, позволяющий заполнить двумерный массив норм на переналдку.

На рис. 5.16 приведен фрагмент программы, в котором определяются значения массивов для каждой строки набора работ.

Для расчета загрузки машины в цикле по строкам работ накапливается трудоемкость набора работ *Wip* (рис. 5.17). Полный фонд времени *Fond* по всем работам на горизонте планирования устанавливается по строке с наибольшим резервом времени в рабочих часах. Коэффициент загрузки *KWip* определяется как частное от деления полной трудоемкости на фонд времени.

```
Option Base 1
Dim des() As Integer      'массив номеров работ'
Dim p() As Single        'массив трудоемкости в часах непрерывной работы'
Dim dd() As Single       'массив требуемых моментов окончания в рабочих часах после начала планирования'
Dim d() As Single        'массив требуемых моментов окончания в календарных часах после начала планирования'
Dim qs() As Single       'массив требуемых дат начала в рабочих часах после начала планирования'
Dim z() As Single        'массив дат поступления в цех в календарных часах после начала планирования'
Dim Vid() As Integer     'массив видов работ'
Dim W() As Single        'массив весов работ'
Dim Ex() As Integer      'массив выполнения в процентах'
Dim s() As Single        'массив норм времени на переналдку'
Dim OrMass() As Single   'массив координат графика'
Dim G As Single, a As Single 'длительность планового периода, психологический коэфф.'
Dim c As Single, CP As Single, CH As Single 'стоимость смены, стоимость нормочаса простоя, стоимость нормочаса наладки'
Dim E() As Single 'массив длительности рабочего дня'
Dim Tn As Single 'момент начала рабочего дня в часах'
Dim FO As Single 'момент освобождения машины -начала первого дня планирования'
Dim Vid0 As Integer 'вид работы в начальный момент'
Dim Delta As Integer 'количество дней в календаре'
Dim C1 As Single 'момент окончания работы'
Dim Tk() As Single 'массив моментов начала работы в узле'
Dim Commen() As Single 'массив начала работ для недоминируемых узлов всех уровней'
Dim a1() As Single 'массив индексов выполнения работ'
Dim U() As Single, V() As Single 'массивы функций затрат и функции полезности заказов, недоминируемые узлы всех уровней'
Dim Par() As Integer 'массив номеров родительских узлов для недоминируемых узлов всех уровней'
Dim Comp() As Single 'массив моментов окончания работ для недоминируемых узлов всех уровней в календарных часах после начала'
Dim Number() As Integer 'массив номеров, предшествующих первым узлам в уровнях'
Dim NP() As Integer 'массив номеров строк работ в узлах для недоминируемых узлов всех уровней'
Dim UStage() As Single, VStage() As Single 'массивы функции затрат и функции полезности заказов на текущем уровне'
Dim ParStage() As Integer 'массив номеров родительских узлов на текущем уровне'
Dim CompStage() As Single 'массив моментов окончания работ на текущем уровне в календарных часах после начала планирования'
Dim NPStage() As Integer 'массив номеров строк работ в узлах на текущем уровне'
Dim int1 As Integer, int2 As Integer 'уровень дерева, узел'
Dim InstSheet As Worksheet
```

Рис. 5.14 Глобальные переменные программы

```

UpperLeft2 = Cells(1, "M").Value 'Имя первой ячейки стоимости переналадок
LowerRight2 = Cells(1, "L").Value 'Имя последней ячейки стоимости переналадок
BetaVid = Range(UpperLeft2, LowerRight2).Rows.Count 'количество видов работ
GammaS = Range(UpperLeft2, LowerRight2).Columns.Count 'количество видов работ
ReDim s(BetaVid, GammaS)
For j = 1 To GammaS 'вид работ до настройки'
Alfa = Range(UpperLeft2, LowerRight2).Row
Gamma = Range(UpperLeft2, LowerRight2).Column + j - 1
For i = 1 To BetaVid 'вид работ после настройки'
s(i, j) = Cells(Alfa, Gamma).Value
Alfa = Alfa + 1
Next i
Next j

```

Рис. 5.15 Часть программы, обеспечивающая ввод таблицы переналадок

```

For i = 1 To Beta 'наполнение массивов работ '
des(i) = Cells(Alfa, Gamma).Value 'обозначения работ (номера)
p(i) = Cells(Alfa, Gamma + 1).Value 'трудоемкость работ
d(i) = Cells(Alfa, Gamma + 2).Value 'срок выполнения в календарных часах от начала '
r(i) = Cells(Alfa, Gamma + 3).Value 'срок поступления на склад в календарных часах от начала
Vid(i) = Cells(Alfa, Gamma + 4).Value 'вид работы
W(i) = Cells(Alfa, Gamma + 5).Value 'весовой коэффициент
Ex(i) = Cells(Alfa, Gamma + 6).Value 'процент выполнения
...
Next i

```

Рис. 5.16 Определение необходимого момента начала работы в рабочих часах

```

Wip = 0 'начальное значение загрузки'
Fond = 0 'начальное значение резерва времени'
For i = 1 To Beta 'наполнение массивов работ '
...
If d(i) > 0 Then 'если резерв времени положительный
dd(i) = WorkHours(d(i)) 'количество рабочих часов в заданном сроке
Else
dd(i) = 0 'срок выполнения равен 0
End If
gs(i) = dd(i) - p(i) + 1 'необходимый момент начала в рабочих часах
If dd(i) > Fond Then
Fond = dd(i) 'полный резерв времени всех заказов в рабочих часах'
End If
If Cells(1, "Y").Value = 0 Or (Cells(1, "Y").Value = 1 And d(i) <= NGor) Then
' учитывается фонд рабочего времени в пределах горизонта в календарных часах
Wip = Wip + p(i) 'накопленная загрузка в рабочих часах
End If
...
Next i
If Cells(1, "Y").Value = 1 Then 'при моделировании
Fond = Gor 'фонд времени равен рабочим часам на горизонте планирования
End If
KWip = Round(Wip / Fond, 1) 'загрузка машин

```

Рис. 5.17 Расчет коэффициента загрузки

При моделировании коэффициент загрузки определяется в рамках установленного горизонта планирования. Соответственно, как фонд времени, так и накопленная загрузка подсчитываются в пределах этого горизонта. Количество рабочих часов в заданном сроке для каждой работы определяется с помощью функции  $WorkHours(d(i))$ .

После подготовки исходных массивов рассчитываются значения исходных значений критериев в корне дерева. Величина относительных затрат в корне  $U_0 = 0$ , функция полезности заказов  $\bar{V}_0$  определяется с помощью функций  $Napr2()$  и  $Napr1()$ .

На рис. 5.18 приводится цикл расчета основных параметров узлов первого уровня по всему количеству заказов  $Beta$  (блок 3 на рис. 5.13). Для каждого выполняемого заказа (строки набора), если начальная установка машины  $Vid0$  определена, при помощи функции  $Calend()$  определяется возможный момент начала обработки  $Tk(n)$  по времени переналадки  $s()$ , необходимо для перехода с начальной настройки  $Vid0$  на настройку  $Vid(i)$  для текущей строки заказа  $i$ . В том случае, если  $Vid0$  равна 0, подсчитывается средняя трудоемкость  $m$  переналадки по всем видам работ.

Момент начала проверяется с учетом времени поступления на машину с помощью функции  $Arrival()$  (п. 4.5). По моменту начала обработки и величине трудоемкости, используя

```

n = 0
For i = 1 To Beta      'цикл по возможным работам на первом уровне'
If Ek(i) < 100 And (Cells(1, "Y").Value = 0 Or (Cells(1, "Y").Value = 1 And d(i) <= HBox)) Then
                                'для незаконченных работ на горизонте
aJ(i) = 0.5 'выполняемая работа
n = n + 1      'порядковый номер разветвляемого узла на первом уровне'
If Vid0 > 0 Then 'если начальная установка машины определена
Tk(n) = Calend(K0, s(Vid(1), Vid0), 1) 'возможный момент начала работы машиной
Else 'если начальная установка машины не определена
Ekes = 0
For j = 1 To NVid 'по всем видам работ
Ekes = Ekes + s(Vid(j), Vid(i))
Next j
m = Round(Ekes / NVid, 0) 'средняя трудоемкость наладки
Tk(n) = In + m 'возможный момент начала работы машиной
End If
aJDur = Arrival(r(i)) 'момент поступления работы на машину
If aJDur > Tk(n) Then 'учет времени поступления заготовки (материала)
Tk(n) = aJDur 'возможный момент начала работы машиной в календарных часах
End If
Ekes = Tk(n)
CompStage(n) = Calend(Tk(n), p(i), 2) 'момент окончания работы в календарных часах
If CompStage(n) = 0 And Ekes > 0 Then 'если не определен момент окончания работы
MsgBox " Преминутся длительность календаря "
Exit Sub
End If
VStage(n) = (V0 * K0 + VZak(Beta, i, K0, Tk(n), CompStage(n))) / CompStage(n) 'полезность набора работ
If Vid0 > 0 Then 'если начальная установка машины не определена
UStage(n) = UZak(i, 0, Vid0) 'трудоемкость начальной наладки
Else
UStage(n) = m 'трудоемкость начальной наладки
End If
ParStage(n) = 0      'номер родительского узла в дереве решений
NPStage(n) = i      'номер текущей строки
aJ(i) = 1           'возврат указателя выполняемой работы
Else
aJ(i) = 0           'работа выполнена или находится за горизонтом
End If
Next i

```

Рис. 5.18 Фрагмент программы по расчету параметров узла на первом уровне

функцию  $Calend()$ , определяется момент окончания работы  $CompStage(n)$ . Если в работе нет перерывов, момент окончания работы первого уровня равен сумме  $Tk$  и трудоемкости работы  $p$ , при наличии перерывов этот момент включает их длительность. Соответственно величина  $CompStage(n)$  совпадает с длительностью  $Fk$  в формуле 3.20.

Полезность всего объема работ, выполняемых в  $n$ -ом узле  $VStage(n)$  определяется по этой формуле как сумма начальной полезности  $\bar{V}_0$  в момент начального освобождения машины  $T0$  и полезности всех планируемых работ, определяемой с помощью функции  $VZak()$  (п. 4.3), отнесенных к моменту  $CompStage(n)$ . При этом входные параметры  $inBeta = Beta$ ,  $ink = i$ ,  $snCl = T0$ ,  $snTk = Tk$ ,  $snFk = CompStage(i)$ .

Если начальная установка машины  $Vid0$  определена, функция затрат  $UStage(n)$  рассчитывается с помощью программной функции  $UZak()$ , приведенной в п. 4.3, со входными параметрами  $ink = i$ ,  $inl = 0$ ,  $inVid = Vid0$ . В противном случае функция затрат  $UStage(n)$  приравнивается к средней трудоемкости переладки.

На первом уровне дерева предыдущий родительский узел дерева  $ParStage(n) = 0$ , а номер выполняемой строки  $NP(n) = i$ . После организации узла указатель выполняемой работы  $aJ(i)$  возвращается в единицу.

Отсечение узлов по критериям (блок 4 на рис. 5.13) производится в рамках двойного цикла (рис. 5.19). Отсечение проводится в соответствии с правилами, описанными в п.п. 3.4.1, 3.4.2 и 3.4.3. Оставшиеся ветви на первом уровне имеют метку  $MetCurStage(j) = 0$ .

Оставшиеся ветви пересчитываются и переносятся в полные массивы недоминируемых узлов дерева решений (рис. 5.20)

На последующих уровнях построения дерева решений все этапы программы первого уровня повторяются с некоторыми изменениями. Прежде всего, устанавливаются параметры ограничения вариантов по длительности согласно п. 3.4.4. (рис. 5.21). Под параметром  $sngDiap$  понимается наибольшее возможное отношение длительности допустимого варианта к варианту с наименьшей продолжительностью.

Затем проводится цикл по исходящим узлам предыдущего уровня (рис. 5.22). В начала цикла осуществляется подготовка параметров каждого такого узла. Номер узла  $intZ$  в дереве

```

intN = Beta           'начальное возможное количество узлов разветвления на первом уровне'
For i = 1 To Beta     'подготовка меток для узлов первого уровня'
  MetCurStage(i) = 0
Next i
For j = Beta To 1 Step -1 'нахождение недоминируемых узлов первого уровня'
  If Ex(j) = 100 Or d(j) > BGr Then 'для нерассматриваемых работ на горизонте
    intN = intN - 1 'количество разветвленных узлов уменьшается
    MetCurStage(j) = 1 'метка доминирования
  Else
    For i = 1 To Beta
      For j <> i
        If UStage(j) >= UStage(i) And VStage(j) <= VStage(i) And gs(j) > gs(i) Then 'условие доминирования'
          intN = intN - 1 'количество разветвленных узлов первого уровня '
          MetCurStage(j) = 1 'метка доминирования над текущей работой'
          i = Beta 'выход из цикла'
        End If
      End If
    Next j
  End If
Next i
End If
Next j

```

Рис. 5.19 Фрагмент программы для механизма отсечения первого уровня

```

n = 0
For i = 1 To Beta
  If MetCurStage(i) = 0 Then 'если ветка не доминируемая
    n = n + 1 'счетчик не доминируемых ветвей
    TreeStage(n) = i 'номера разветвляемых узлов первого уровня'
  End If
Next i
Number(i) = 0 'узел перед первым'
For i = 1 To intN 'по всем недоминируемым узлам первого уровня
  k = TreeStage(i) 'номер исходного узла
  U(i) = UStage(k) 'включение недоминируемых узлов первого уровня в полные массивы недоминируемых узлов'
  V(i) = VStage(k)
  Par(i) = ParStage(k)
  Comp(i) = CompStage(k)
  NP(i) = NPStage(k)
  Comen(i) = Tr(k)
  TreeStage(i) = i 'номера узлов полных массивов, соответствующих недоминируемым узлам первого уровня'
Next i

```

Рис. 5.20 Перенос параметров узлов первого уровня в полные массивы дерева

```

intMach = Beta 'граница начала работы переменного ограничителя вариантов
For intY = 2 To Beta 'цикл по уровням'
  If Ex(intY) < 100 Then 'для незаконченных работ
    If intMach <= B1 Then 'наибольшее число работ с ограничением вариантов по длительности'
      sqgDiar = B2 'наибольший диапазон по длительности ветвей'
    Else
      sqgDiar = 1 + (B2 - 1) * Exp(-B3 * (Sqr(intMach) - Sqr(B1)) * intY) 'уменьшение диапазона
        'с ростом количества работ и степени планирования'
    End If
    intU = intN * (Beta - intY + 1) 'количество добавляемых узлов на каждом уровне'
    ...
  End If
Next intY 'конец цикла по уровням'

```

Рис. 5.21 Ограничение вариантов по длительности расписания

```

n = 0
For intZ = 1 To intN 'цикл по узлам разветвления на уровне'
  Cl = Comp(TreeStage(intZ)) 'момент окончания работы в родительском узле'
  For i = 1 To Beta 'установка меток работ на невыполнение'
    aJ(i) = 1
  Next i
  k = TreeStage(intZ) 'номер последнего построенного узла дерева
  m = NP(TreeStage(intZ)) 'номер строки работ для последнего узла
  aJ(NP(k)) = 0 'метка работы в узле разветвления'
  Do Until Par(k) = 0 'престановка меток ранее выполненных работ'
    k = Par(k) 'переход по построенной цепочке
    aJ(NP(k)) = 0 'метка выполненных работ
  Loop
  ...
Next intZ

```

Рис. 5.22 Подготовка параметров узла ветвления

решений определяется массивом  $TreeStage(intZ)$ , значения которого устанавливаются выше (рис. 5.20).

Для каждого исходящего узла  $intZ$  проводится ветвление по невыполненным работам (блок 10 на рис. 5.13), листинг которого приведен на рис. 5.23. Отличие рис. 5.23 от рис. 5.18 на первом уровне заключается в том, величины критериев  $UStage(n)$  и  $VStage(n)$  включают 2 составляющих: первая из них определяется всей цепочкой предыдущего построения по формулам 3.18 и 3.27, а вторая определяется также, как и на первом уровне, т.е. при помощи функций  $UZak()$  и  $VZak()$ .

Возможный момент начала обработки  $Tk(n)$  определяется при помощи функции  $Calend()$ , в которой флаг использования устанавливается в положение 1. При применении этой функции для расчета момента окончания работы  $CompStage(n)$  флаг устанавливается в положение 2.

Отсечение узлов по критериям (блок 11 на рис. 5.13) производится аналогично отсечению на первом уровне (рис. 5.19). Отличие состоит в том, что при исчерпании всех возможных работ программа должна автоматически остановиться и выдать полученные варианты расписания. На рис. 5.24 приведен механизм отсечения на уровнях построения дерева выше первого.

На всех уровнях, кроме последнего, для отсечения используются 3 условия, аналогичные условиям на рис. 5.19. На последнем уровне используются только первые 2 условия. В том случае, если система не может создать новые узлы дерева (как правило, при исчерпании всех работ) выставляется флаг  $FlagM = 1$ , по которому происходит окончание построения дерева.

На каждом уровне построения система проверяет установленное ограничение по длительности выполнения, и отбрасывает излишние варианты (рис. 5.25). Для отбраковки излишние

```

For i = 1 To Beta           'цикл по всем (невыполненным) работам'
If En(i) < 100 Then       'для невыполненных в момент планирования
If Cells(1, "Y").Value = 0 Or (Cells(1, "Y").Value = 1 And d(i) <= Hог) Then 'без моделирования
                                'или до горизонта моделирования
If aJ(i) > 0 Then         'отбрасываются невыполненные работы на этапе построения дерева'
aJ(i) = 0.5              'указатель для выполненной работы'
n = n + 1                'порядковый номер разветвляемого узла на текущем уровне'

Tk(n) = Calend(C1, s(Vid(i), Vid(m)), 1) 'момент начала новой работы с учетом времени переналадки

sngDur = Arrival(r(i)) 'момент прибытия работы на машину
If sngDur > Tk(n) Then 'учет времени поступления заготовки
Tk(n) = sngDur         'возможное начало работы с учетом поступления
End If
CompStage(n) = Calend(Tk(n), p(i), 2) 'момент окончания работы'
Fr = CompStage(n) - p(i) - C1        'время простоя машины
UStage(n) = U(TreeStage(intZ)) + UZak(i, m, 0) + Fr * CP / c 'затраты на текущем уровне
If CompStage(n) = 0 Then 'если не определен момент окончания работы
MsgBox " Превышается длительность календаря "
Exit Sub
End If
VStage(n) = (V(TreeStage(intZ)) * C1 + VZak(Beta, 1, C1, Tk(n), CompStage(n))) / CompStage(n)
ParStage(n) = TreeStage(intZ) 'родительский узел
NPStage(n) = 1 'строка выполняемой работы
aJ(i) = 1 'возврат метки выполнения работы
End If
End If
Else
aJ(i) = 0
End If
Next i

```

Рис. 5.23 Расчет параметров создаваемого узла на уровнях после первого

```

FlagM = 0 'флаг узлов
If a > 0 Then 'если есть новые узлы
  intN = intU 'наибольшее возможное количество разветвляемых узлов на новом уровне'
  ReDim MetCurStage(intU) 'метки узлов, отосланных к текущему уровню'
  For j = intU To 1 Step -1 'нахождение недоминируемых узлов на текущем уровне'
    MetCurStage(j) = 0 'начальное значение метки доминирования'
    If NPStage(j) = 0 Then 'если в элементе массива нет выполняемой работы (узла дерева) (предохранитель)'
      intN = intN - 1
      MetCurStage(j) = 1 'метка доминирования'
    Else
      For i = 1 To intU 'количество сравниваемых узлов на текущем уровне'
        If NPStage(i) > 0 Then 'предохранитель'
          If i <> j Then
            If intY < Beta Then 'проверка для уровней, кроме последнего'
              If (UStage(j) >= UStage(i) And VStage(j) <= VStage(i) And gs(NPStage(j)) >= gs(NPStage(i))) Then
                'для доминирования i над j нужно, чтобы оба критерия доминирования, и необходимый момент начала работы был больше'
                intN = intN - 1
                MetCurStage(j) = 1 'метка доминирования над текущей работой'
                i = intU 'выход из цикла'
              End If
            Else 'проверка для последнего уровня'
              If UStage(j) >= UStage(i) And VStage(j) <= VStage(i) Then
                intN = intN - 1
                MetCurStage(j) = 1 'метка доминирования над текущей работой'
                i = intU 'выход из цикла'
              End If
            End If
          End If
        End If
      Next i
    End If
  Else
    FlagM = 1 'устанавливается флаг отсутствия новых узлов
  End If

```

Рис. 5.24 Механизм отсекаемых на уровнях выше первого

длинных вариантов сначала находится наиболее короткий вариант с длительностью  $sngCz$ . Вариант считается допустимым, если его продолжительность  $CompStage(i)$  меньше длительности самого короткого варианта, умноженной на параметр  $sngDiar$ , определенный на рис. 5.20

Оставшиеся ветви пересчитываются и переносятся в полные массивы недоминируемых узлов дерева решений (рис. 5.26).

Отличие переноса данных на уровнях больше первого от начального уровня состоит в том, что размеры массивов не объявляются заново, а добавляются к предыдущим значениям при помощи оператора Preserve. Такой способ позволяет последовательно накапливать данные всех недоминируемых узлов в полных массивах дерева.

После окончания построения дерева решений определяется область расположения вариантов решения на листе и производится сортировка вариантов по убыванию массива  $V$  критерия полезности (рис. 5.27). Для сортировки необходимо указать ее область, которая в данном случае ограничивается ячейками  $Temp$  и  $Temp1$ . Эта область состоит из двух столбцов  $Gamma$  и  $Gamma - 1$ , ограниченных строками  $Alfa$  и  $Alfa + n$ .

Для каждого варианта запись последовательности выполнения работ формируется, начиная с последнего узла. Для наглядности различные работы в одной записи при их последовательном выполнении объединяются в группы одного вида. При этом одновременно подсчитывается количество необходимых переналадок с одного вида на последующий. Фрагмент такого расчета приведен на рис. 5.28.

```

If intN > 0 And FlagM = 0 Then 'есть доминируемые узлы
  ReDim TreeStage(intN) 'номера разветляющихся узлов в уровне'
  flag = 0
  For i = 1 To intU
    If MetCurStage(i) = 0 Then 'для недоминируемых узлов'
      If flag = 0 Then
        sngCz = CompStage(i) 'установка начального значения длительности ветви'
        flag = 1
      Else
        If CompStage(i) < sngCz Then
          sngCz = CompStage(i) 'нахождение минимальной длительности ветви'
        End If
      End If
    End If
  Next i
  n = 0
  For i = 1 To intU
    If MetCurStage(i) = 0 And CompStage(i) <= sngDiar * sngCz Then
      'включение не доминируемых ветвей в установленном диапазоне длительности'
      n = n + 1 'недоминируемые узлы на текущем уровне'
      TreeStage(n) = i
    End If
  Next i

```

Рис. 5.25 Отбраковка вариантов с излишней длительностью.

```

intN = n 'количество узлов
intNodes = intNodes + n 'полное количество узлов во всем дереве'
ReDim Preserve U(intNodes) 'переназначение массивов'
ReDim Preserve V(intNodes)
ReDim Preserve Par(intNodes)
ReDim Preserve Commen(intNodes)
ReDim Preserve Comp(intNodes)
ReDim Preserve NP(intNodes)
For i = 1 To intN 'перенос данных в полные массивы для недоминируемых узлов'
  k = TreeStage(i) 'порядковый номер узла текущего уровня для недоминируемых узлов этого уровня
  U(Number(intY) + i) = UStage(k)
  V(Number(intY) + i) = VStage(k)
  Par(Number(intY) + i) = ParStage(k)
  Comp(Number(intY) + i) = CompStage(k)
  Commen(Number(intY) + i) = Tk(k)
  NP(Number(intY) + i) = NPStage(k)
  TreeStage(i) = Number(intY) + i 'массив номеров узлов полных массивов для рассчитанного уровня'
Next i

```

Рис. 5.26 Перенос данных уровня в полные массивы дерева

Для полученного набора вариантов проводится поиск наиболее целесообразного варианта методами Сэвиджа и Гурвица. Поскольку описание этих методов выходит за рамки настоящей книги, с ними можно ознакомиться, например, по книге (Мауэрграуз, 2012). Фрагмент листинга, содержащий поиск по Сэвиджу и Гурвицу, приведен на рис. 5.29.

Полученные результаты поиска наилучшего решения печатаются на листе MS Excel. Непосредственно после этих результатов записываются значения средних затрат на наладку и средней полезности заказов по каждому варианту, а также значения коэффициента группирования, коэффициента запаздывания, полной длительности выполнения, среднего и наибольшего запаздываний.

```

Temp = Cells(1, "P").Value 'область вариантов решения
Alfa = Range(Temp).Row
Gamma = Range(Temp).Column
...
Cells(1, "I").Value = n 'количество новых вариантов
For i = 1 To n
Cells(Alfa + i, Gamma).Value = -V(TreeStage(i)) 'для сортировки в порядке убывания V'
Cells(Alfa + i, Gamma - 1).Value = 1
Next i
Temp1 = Chr(64 + Gamma - 1) & CStr(Alfa + n) 'буквенный код колонки на 1 меньше Gamma, номер строки на n больше Alfa
Shift = Alfa + n 'начальное положение ячеек записи'
InstSheet.Range(Temp, Temp1).Sort _
Key1:=InstSheet.Columns(Gamma) 'область сортировки между Temp и Temp1
Temp = LTrim(Cells(Shift, Gamma).Value) 'удаление пробелов в последней строке сортировки'
Do While Len(Temp) = 0
Shift = Shift - 1 'поиск положения последней заполненной ячейки'
Temp = LTrim(Cells(Shift, Gamma).Value) 'удаление пробелов в пустых строках сортировки'
Loop
For i = 1 To n
VarNumber(i) = Cells(Shift - n + i, Gamma - 1).Value 'номер варианта до сортировки'
Cells(Shift - n + i, Gamma).Clear
Cells(Shift - n + i, Gamma - 1).Clear
Next i

```

Рис. 5.27 Сортировка вариантов решений по критерию полезности

```

k = TreeStage(VarNumber(i)) 'последний узел варианта'
Result = " " 'выходная строка номеров работ в последнем узле'
ResSort = " " 'строка номеров работ в в одной группе'
l = Beta 'полное число работ'
m = Vid(NP(k)) 'текущей вид работы'
Cd(i) = Comp(k) 'Момент окончания работы варианта'
MStage(NP(k)) = Comp(k) 'момент выполнения работы'
q = 1 'количество работ одного вида в группе'
x = 1
Cells(Alfa + 1, Gamma).Value = des(NP(k))
Do Until Par(k) = 0
k = Par(k) 'цикл до начала дерева поиска'
x = x + 1 ' количество запланированных работ'
MStage(NP(k)) = Comp(k) 'момент выполнения работы'
If Vid(NP(k)) = m Then 'проверка условия нахождения в одной группе'
l = l - 1 'сдвиг ячейки записи вверх'
Cells(Alfa + 1, Gamma).Value = des(NP(k)) 'накопление разных работ одного вида'
q = q + 1 'количество работ одного вида'
Else 'переход на другую группу'
Z = Z + 1 'расчет количества перенестоек'
Shift = Alfa + Beta 'начальное положение ячеек записи'
For j = 1 To q 'цикл по группе'
ResSort = ResSort & CStr(Cells(Shift - q + j, Gamma).Value) & ", " 'наполнение строки номеров групп'
Cells(Shift - q + j, Gamma).Clear 'очистка ячеек'
Next j
Result = ResSort & " " & Result 'перенос группы в выходную строку'
ResSort = " " 'подготовка работы со следующей группой'
q = 1
l = Beta
m = Vid(NP(k)) 'запоминание нового вида работ'
Cells(Alfa + 1, Gamma).Value = des(NP(k)) ' запись номера работы в строке текущего узла'
End If
Loop

```

Рис. 5.28 Фрагмент составления выходной записи варианта

```

For i = 1 To n           'цикл по исследуемому вариантам'
  UG(i) = U(TreeStage(i)) 'массив функций полезности U
  VG(i) = V(TreeStage(i)) 'массив функций полезности V
Next i
maxU = Application.Max(UG())
minU = Application.Min(UG())
maxV = Application.Max(VG())
minV = Application.Min(VG())
spgGurV = Cells(1, "P").Value 'Заданный коэффициент метода Гурвица'
If maxU = minU Then      'предохранитель на случай, когда на расчетном горизонте все варианты одинаковы'
  l = 1
  m = 1
Else
  For i = 1 To n         'нахождение наибольших сомалей по методу Сэмюэла'
    SU(i) = (UG(i) - minU) / (maxU - minU) 'массив функций сомалей U
    SV(i) = 1 - (VG(i) - minV) / (maxV - minV) 'массив функций сомалей V
    maxS(i) = Application.Max(SU(i), SV(i)) 'массив наибольших сомалей по U или V
  Next i
  l = 1
  For i = 2 To n         'определение варианта с минимальным сомаем'
    If maxS(i) < maxS(l) Then
      l = i              'нахождение номера варианта с минимумом наибольшего сомаля
    End If
  Next i
  For i = 1 To n         'нахождение характеристик вариантов по методу Гурвица'
    SU(i) = 1 - (UG(i) - minU) / (maxU - minU) 'массив нормированной полезности по U
    SV(i) = (VG(i) - minV) / (maxV - minV)     'массив нормированной полезности по V
    maxGur = Application.Max(SU(i), SV(i))     'критерий принципа оптимизма
    minGur = Application.Min(SU(i), SV(i))     'критерий принципа гарантированного результата
    maxS(i) = spgGurV * minGur + (1 - spgGurV) * maxGur 'массив комбинаций Гурвица
  Next i
  m = 1
  For i = 2 To n         'определение варианта с максимальным критерием Гурвица'
    If maxS(i) > maxS(m) Then
      m = i              'определение лучшего варианта по Гурвицу'
    End If
  Next i
End If
ResultS = " по методу Сэмюэла - вариант " & l
ResultG = " по методу Гурвица - вариант " & m

```

Рис. 5.29 Фрагмент листинга с поиском наилучшего решения

Для выбранного варианта осуществляется запись его расписания в календарных часах. Параллельно создается массив исходных данных для построения диаграммы Ганта в рабочих часах (п. 4.6).

## 5.7 Перепланирование расписания

В п. 5.4 описывалась работа программы с некоторой начальной датой, или без изменения ранее заданной даты. В настоящем параграфе рассмотрим составление расписания при любом изменении начальной даты планирования. Такое изменение возможно как при появлении нового календарного задания, так и при необходимости выполнения срочной работы.

Рассмотрим действия пользователя на примере задания, первоначально имеющего вид, приведенный на листе 2 в книге MBook1.xls. Задание на 12.10.16 8:00 состоит из 20 работ семи видов, причем в начальный момент машина настроена на вид 3. В случае, показанном на календарном графике, в течение первого рабочего дня планируются две 8-часовые рабочие смены. Следующий рабочий день предвыходной, и в нем предусматривается только одна смена. После

выходного дня планируется двухсменная работа. Поскольку работа 1 в начале планирования уже серьезно запаздывает, для нее установлен весовой коэффициент 3.

Запуск программы приводит к девяти не доминируемым вариантам, причем метод Сэвиджа рекомендует вариант 5, а метод Гурвица – вариант 7. Изучая возможные варианты расписания, видим, что они значительно отличаются по своим показателям. Например, среднее запаздывание  $T_c$  имеет наименьшее значение, равное 6,7 часа, в варианте 4. Допустим, что именно вариант 4 выбран в качестве действующего расписания, показанное на рис. 5.30.

Поскольку продолжительность первого рабочего дня в данном случае составляет 16 часов, при работе в точном соответствии с расписанием, в течение дня должны быть полностью выполнены работы 1, 5, 2, 6, 3, 4, а также начата работа 8. На следующий день запланировано окончание работы 8, выполнение работ 12, 10, 7, 15, 9, 13. Поскольку третий календарный день является не рабочим, то продолжение работ приходится на четвертый календарный день. В начале должна быть выполнена работа 16, затем выполняются работы 18, 14, 19, 11 и начинается работа 20. В течение пятого календарного дня должна быть закончена работа 20 и выполнена работа 17.

Допустим, что к концу первого дня выполнения расписания, составленного для упомянутого выше задания, появляется срочная работа с номером 21, которая должна быть включена в составленный ранее план. Очевидно, что к началу следующего рабочего дня необходимо провести перепланирование, в котором нужно учесть как появление новой работы, так и результаты прошедшего рабочего дня.

Для перепланирования целесообразно полностью скопировать предыдущее задание на следующий лист MS Excel – в данном случае, на лист 3. В таблицу задания A4:G23 необходимо внести данные о выполнении за прошедший рабочий день: 100% выполнения работ 4, 1, 5, 2, 6, 9. Допустим, что работа 3 также уже начата и выполнена на 60%.

При внесении данных о работе, которая переносится на следующее планирование, имеются 2 возможности: в первом случае можно только указать процент ее выполнения, причем начальный момент освобождения машины при перепланировании равен началу работы следующего дня. В этом случае программа не гарантирует, что первой планируемой выполняемой работой во всех вариантах будет именно эта работа, в данном случае работа 3.

Если пользователь считает, что, несмотря на новые обстоятельства, необходимо продолжить выполнение уже начатой работы, то для работы 8 так же, как и для предыдущих работ, нужно указать 100% выполнения, но при этом необходимо задать начальный расчетный момент освобождения машины.

Кроме того, в конце таблицы задания допишем данные новой работы 21. Поскольку работа срочная, присвоим ей весовой коэффициент 3. На рис. 5.31 приведена таблица предыдущего задания с внесенными изменениями, в которой указано, что работа 8 была выполнена в предыдущий день на 70%.

Кроме внесения изменения в таблицу задания, необходимо провести сдвиг влево рабочего календаря на количество дней, прошедших после первоначального планирования. В данном случае этот сдвиг равен одному дню. В заголовке рабочего календаря изменяем дату нового планирования на 13.10.2016 8:00.

План обработки по варианту 4 в календарных часах

10,4 (1) 12,4; 12,4 (5) 13,4; 13,8 (2) 15,8; 16 (6) 17; 17,4 (3) 18,4; 18,8 (4) 21,8; 21,8 (8) 32,8; 32,8 (12) 35,8; 36 (10) 36; 36,2 (7) 41,2; 41,2 (15) 43,2; 43,4 (9) 46,4; 46,8 (13) 47,8; 80 (18) 83; 83,4 (18) 86,4; 86,6 (14) 89,6; 89,6 (19) 91,6; 92 (11) 95; 95,4 (20) 106,4; 107 (17) 108;

Рис. 5.30 Расписание работ на листе 2

№ работы	Трудоемкость работы н/час	Требуемый момент готовности, календ. часы	Ожидаемый момент поступления, календ. часы	Вид работы	Весовой коэффициент	Выполнение, %
1	2	-1	-3	1	3	100
2	2	10	0	2	1	100
3	1	15	1	7	1	100
4	3	12	1	3	1	100
5	1	18	2	1	1	100
6	1	20	3	4	1	100
7	3	31	2	5	1	0
8	3	30	2	3	1	70
9	3	44	13	4	1	0
10	2	48	20	6	1	0
11	3	54	28	2	1	0
12	3	60	30	3	1	0
13	1	65	30	7	1	0
14	3	72	35	6	1	0
15	2	79	40	5	1	0
16	3	82	48	7	1	0
17	2	84	55	4	1	0
18	3	86	60	3	1	0
19	2	94	65	1	1	0
20	3	106	85	3	1	0
21	2	32	16	7	3	0

**Рис. 5.31** Таблица задания на 12.10.16 8:00 с изменениями к концу первого рабочего дня

На рис. 5.32 приведена форма подготовки к новому планированию.

В окна формы необходимо ввести данные о моменте перепланирования и имена ячеек начала и конца списка работ. После проведения перепланирования таблица задания в данном случае примет вид, показанный на рис. 5.33.

Из рис. 5.33 следует, по результатам предыдущего рабочего дня работа 3 оказалась просроченной, и появилась срочная работа 21 с весовым коэффициентом 3. После подготовки можно снова запустить программу, выбрать опции «без моделирования» и «без подготовки к перепланированию» и перейти к форме ввода данных (рис. 5.34).

Форма на рис. 5.34 полностью совпадает с формой на рис. 5.3. При ее заполнении следует обратить особое внимание на имя последней ячейки списка работ, поскольку этот список изменялся при подготовке планирования. Кроме того, начальная настройка вида работ определяется номером вида последней работы предыдущего дня, а момент освобождения определяется из соображений, описанных выше при заполнении таблицы на рис. 5.31. Момент планирования на рис. 5.34 должен совпадать с датой рабочего календаря.

Результат перепланирования показан на рис. 5.35.

Как видно из рис. 5.35, в новых вариантах плана предлагаются несколько возможностей, причем в данном случае метод Гурвица рекомендует варианта 2, а метод Сэвиджа рекомендует вариант 3. В большинстве вариантов рекомендуется сначала закончить начатую работу 8, и только потом перейти к срочной работе 21, хотя один вариант с немедленным переходом к работе 21 также существует.

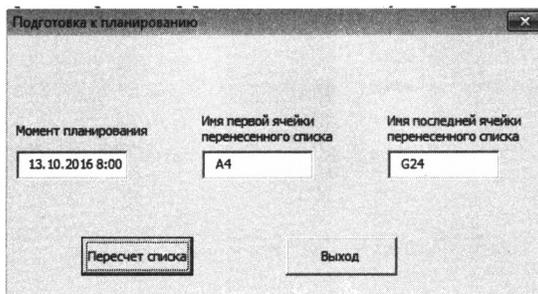


Рис. 5.32 Форма подготовки к новому планированию

№работы	Трудоемкость работы н/час	Требуемый момент готовности, календ. часы	Ожидаемый момент поступления, календ. часы	Вид работы	Весовой коэффициент	Выполнение, %
7	3	7	0	5	1	0
8	3	6	0	3	1	70
9	3	20	0	4	1	0
10	2	24	0	6	1	0
11	3	30	4	2	1	0
12	3	36	6	3	1	0
13	1	41	6	7	1	0
14	3	48	11	6	1	0
15	2	55	16	5	1	0
16	3	58	24	7	1	0
17	2	60	31	4	1	0
18	3	62	36	3	1	0
19	2	70	41	1	1	0
20	3	82	61	3	1	0
21	2	8	0	7	3	0

Рис. 5.33 Таблица задания после подготовки к перепланированию

Интересно сравнить расписание для рекомендуемого варианта 3 на рис. 5.35 с действующим расписанием, составленным ранее по состоянию на начало второго рабочего дня (рис. 5.29).

Из рис. 5.36 следует, что появление срочной работы приводит только к небольшим изменениям в ранее составленном плане, т.е. разработанный метод расчета расписания обеспечивает его устойчивость к внешним воздействиям. В данном случае, необходимость в срочном выполнении работы 21 привела к сдвигу во времени остальных работ, а также к переносу работы 12 из группы с работой 8 на более поздний срок. Отметим также, что использование для срочной работы 21 весового коэффициента, равного 1, приводит к расписанию, в котором предлагается не только закончить ранее начатую работу 8, но и совместить выполнение работы 21 с работами 13 и 16 одного вида 7 (рис. 5.37).

Ввод данных

Положительный коэффициент	Длительность планового периода в днях	Количество рабочих дней	Стоимость рабочей смены	Стоимость нормо-часа наладки	Стоимость нормо-часа простоя
0,1	3	2	8	3	0,2
Имя первой ячейки списка работ	Имя последней ячейки списка работ	Имя первой ячейки времени переналодок	Имя последней ячейки времени переналодок	Имя первой ячейки календаря	Имя последней ячейки календаря
A4	G18	K5	Q11	M20	Z22
Имя первой ячейки результата расчета	Начальная настройка ящика работы	Начало рабочего дня, часы	Момент освобождения в календарных часах	Момент планирования	
G30	3	8	8	13.10.16 8:00	
Такские параметры	Ввод данных в Excel	Запуск программы	Выход из программы		
OK	OK	OK	OK		

Рис. 5.34 Ввод данных при перепланировании

Недоминируемые варианты

Вариант 1:	8, 21,13, 10, 7, 9, 15, 16, 18,12, 14, 19, 20, 11, 17
Вариант 2:	8, 21,13, 10, 7,15, 9, 16, 18,12, 14, 19, 20, 11, 17
Вариант 3:	8, 21,13, 10, 7,15, 9, 16, 18,12, 14, 19, 11, 17, 20
Вариант 4:	8, 21,13, 10, 7,15, 9, 16, 18,12,20, 14, 19, 11, 17
Вариант 5:	21,13, 10,14, 7,15, 8,12,18,20, 16, 11, 9,17, 19

Рис. 5.35 Не доминируемые варианты плана для задания работ

Старое расписание на 12:10:	8,12, 10, 7,15, 9, 13,16, 18, 14, 19, 11, 20, 17
Новое расписание на 13:10:	8, 21,13, 10, 7,15, 9, 16, 18,12, 14, 19, 11, 17, 20

Рис. 5.36 Действующее расписание и его корректировка

Недоминируемые варианты

Вариант 1:	8, 10,14, 7, 9, 21,13,16, 18,12, 11, 15, 20, 19, 17
Вариант 2:	8, 10,14, 7, 9, 21,13,16, 18,12, 15, 11, 20, 19, 17
Вариант 3:	8, 10,14, 7, 9, 21,13,16, 18,12, 15, 19, 11, 17, 20
Вариант 4:	8, 10,14, 7, 9, 21,13,16, 18,12,20, 19, 11, 17, 15
Вариант 5:	8, 10,14, 7, 9, 21,13,16, 18,12,20, 19, 15, 11, 17
Вариант 6:	8, 10,14, 7,15, 9, 21,13,16, 11, 12,18,20, 19, 17

Рис. 5.37 Не доминируемые варианты плана при весовом коэффициенте 1 для работы 21

## 5.8 Моделирование расписания

Целью моделирования расписания является выявление изменений процесса составления расписания и его результатов в зависимости от варьируемых параметров, предусмотренных соответствующей формой моделирования (рис. 5.38).

Форма моделирования на рис. 5.38 содержит 5 возможных параметров для варьирования.

Сначала рассмотрим т.н. ограничители ветвления  $B1$ ,  $B2$  и  $B3$ , используемые в листинге на рис. 5.21. Эти ограничения в совокупности устанавливают наибольшее возможное отношение длительности  $sngDiap$  допустимого варианта к варианту с наименьшей продолжительностью. Параметр  $B1$  определяет величину количества работ, после которой величина  $sngDiap$ , вначале равная амплитуде  $B2$ , начинает уменьшаться с ростом количества работ и номера уровня планирования. Степень этого уменьшения устанавливается с помощью декремента затухания  $B3$ .

Ограничители ветвления весьма существенно уменьшают количество не доминируемых ветвей построения дерева решений за счет отбрасывания «длинных» ветвей с большой продолжительностью выполнения. Поэтому использование ограничителей позволяет уменьшить продолжительность выполнения программы. В то же время, слишком жесткие ограничения по длительности ветвей могут излишне уменьшить количество получаемых вариантов, исключив из этого количества ряд вполне целесообразных вариантов плана.

Варьирование ограничителей имеет смысл при большом количестве работ, поскольку при таком количестве продолжительность выполнения программы может стать значительной. Рассмотрим пример задания на листе 4 MS Excel, в котором приведено 40 работ, каждая из которых может быть начата в любой момент. При варьировании ограничителей целесообразно, исходя из календарного графика, установить наибольший возможный горизонт планирования, а также снять зависимость затрат от простоя машины.

При моделировании выполнения этого задания необходимо сначала провести ввод данных на лист в обычном режиме «без моделирования» и «без подготовки планирования». После такого ввода следует убрать с листа полученные результаты и запустить программу в режиме «моделирование».

Моделирование

Психологический коэффициент (альфа)

Ограничители ветвления

Параметр начала ограничения B1

Амплитуда B2

Декремент затухания B3

Планировый горизонт H в часах работы

Имя первой ячейки результата расчета

Дистанция до таблицы полезностей в колонках

Текущие параметры

Ввод данных в Excel

Запуск программы

Выход из программы

Рис. 5.38 Форма моделирования

При работе программы с параметрами моделирования, приведенными на рис. 5.38, длительность ее работы составляет 19 секунд. Результаты работы записываются на листе 4, причем значения критериев выводятся в таблице справа от соответствующего варианта. При проведении моделирования не обязательно выводить на лист расчет плана по какому-то варианту, а можно ограничиться только записью набора вариантов. В данном случае, система предлагает пользователю набор из 12 вариантов. Можно попробовать несколько ужесточить ограничители ветвления, что уменьшит продолжительность расчета.

Не удаляя полученный вариант с параметрами на рис. 5.38, повторно вызовем программу моделирования и зададим, например, параметры, показанные на рис. 5.39

Отметим, что имя первой ячейки результата смещено вниз по отношению к форме на рис. 5.36, что обеспечивает параллельную запись на листе. При параметрах на рис. 5.39 продолжительность составляет 11 секунд, число вариантов падает до восьми.

Рассмотрим также характер изменения вариантов плана при варьировании психологического коэффициента  $\alpha$ . На листе 4 приведены несколько вариантов расчета плана при коэффициенте  $\alpha$  в пределах 0,05 – 0,15. Эти результаты показывают, что при больших горизонтах уменьшение величины  $\alpha$  увеличивает количество возможных вариантов, и наоборот, увеличение  $\alpha$  это количество снижает.

При моделировании необходимо отрегулировать значения коэффициента  $\alpha$  и параметров  $B1$ ,  $B2$  и  $B3$  с учетом их взаимного влияния. В общем случае с уменьшением коэффициента  $\alpha$  количество рассматриваемых вариантов приходится увеличивать, для чего коэффициенты  $B1$  и  $B2$  должны увеличиваться, а коэффициент  $B3$  уменьшаться.

Рис. 5.39 Форма моделирования с измененными параметрами

## 5.9 График загрузки и критический горизонт планирования

В зависимости 3.6 для производственной напряженности и 3.7 для функции полезности заказов входит величина – количество рабочих дней в плановом периоде. В общем случае, увеличение приводит к расписаниям с некоторым увеличением коэффициента группирования, особенно при относительно малых значениях  $G$ . При значениях  $G$  порядка 5 и более рабочих

дней, дальнейшее увеличение  $G$  существенного влияния на характер расписания оказывает незначительно.

Качество расписания весьма существенно зависит от величины горизонта планирования  $h$ , поскольку с увеличением горизонта планирования в расписание включаются дополнительные работы.

На листе 5 MS Excel приведено задание из 30 работ, причем наибольший срок выполнения, равный 105 календарных часов, имеет работа 27. Перед моделированием следует убедиться, что все необходимые данные правильно вносятся с листа в массивы программы. Для этого целесообразно запустить программу в режиме «без моделирования», а затем удалить результаты расчета.

При работе в режиме «моделирование» для изучения влияния планового горизонта его величина последовательно изменяется при постоянных остальных параметрах моделирования. На листе 5 приведены результаты таких расчетов при увеличении планового горизонта от 20 до 110 календарных часов. Величина планового горизонта устанавливается по заданному сроку выполнения работ, при этом количество учитываемых работ соответственно изменяется. На рис. 5.40 приведены результаты расчета расписаний в этом диапазоне, причем для каждого горизонта выбран один вариант расписания. Если как метод Сэвиджа, так и метод Гурвица предлагают одинаковый вариант расписания, то этот вариант используется для рассмотрения на рис. 5.40. В том случае, когда методы рекомендуют разные варианты, использован один из вариантов, находящихся между этими вариантами.

Как следует из рис. 5.40, на первом месте в расписании находится работа 4, которая имеет тот же вид 3, как и первоначальная настройка. С ростом горизонта в одну группу с работой 4 присоединяется работа 8 того же вида, а, кроме того, работа 10 вида 6, трудоемкость переналадки на которую с вида 3, очень мала.

Затем выполняется группа работ 1,5 вплоть до горизонта 80 календарных часов. При этом происходит резкое изменение расписания, а группирование довольно быстро нарастает.

На рис. 5.41 приведена зависимость коэффициента загрузки от горизонта планирования. Как следует из рисунка, эта зависимость в данном случае подвержена значительным колебаниям. На участке 20-50 календарных часов наблюдается существенное снижение загрузки, которая затем увеличивается и резко возрастает на горизонте порядка 100 часов.

На рис. 5.42 приведены фрагменты листинга программы, в которых рассчитываются некоторые наиболее важные параметры расписаний. Для оценки расписаний при моделировании на различных горизонтах планирования используются 3 параметра:

- полезность выполняемого набора работ, обозначаемая на рис. 5.42 как  $V0$ ;
- приведенные затраты переналадок за один рабочий день  $U0$ ;
- коэффициент группирования  $G0$ .

Горизонт 20: 4, 1.5, 2, 3, 6, 7  
 Горизонт 30: 4, 1.5, 2, 3, 6, 7  
 Горизонт 40: 4.8, 1.5, 2, 6.9, 7, 3, 10  
 Горизонт 50: 4, 1.5, 2, 6, 3.13, 10, 7.15, 9, 8.12, 11  
 Горизонт 60: 4, 1.5, 2, 6, 3.13, 10, 7.15, 8.12, 14, 9, 16, 11  
 Горизонт 70: 4, 1.5, 2, 6, 3.13, 10, 7.15, 8.12, 18, 14, 9, 11, 16, 17  
 Горизонт 80: 4.8, 10, 5.1, 15.7, 6, 3.13, 23, 2.11, 17.9, 21.12, 18, 14, 16  
 Горизонт 90: 4.8, 10, 5.1, 15.7, 6, 3.13, 23, 16, 14, 9, 2.11, 17, 20, 12, 21, 18, 19, 24, 22  
 Горизонт 100: 4.8, 10, 5.1, 15.7, 6.9, 17, 26, 3.13, 23, 16, 12, 18, 20, 21, 19, 2.11, 25, 30, 14, 24, 28, 22  
 Горизонт 110: 4.8, 10, 5.1, 15.7, 6.9, 17, 26, 3.13, 23, 16, 12, 18, 20, 21, 19, 24, 28, 30, 2.11, 25, 29, 14, 27, 22

Рис. 5.40 Рекомендуемые расписания для различных горизонтов

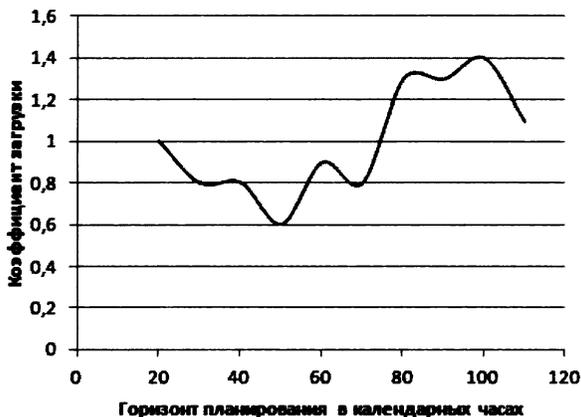


Рис. 5.41 Зависимость загрузки от горизонта планирования

Как видно из рис. 5.42, при моделировании используется не полная величина относительных затрат за период до горизонта планирования  $U(k)$ , а отношение этой величины к полной трудоемкости на горизонте  $Tr$  в рабочих часах, взятое за один рабочий день длительностью  $E$  рабочих часов.

На рис. 5.43 приведены графики параметров для расписаний, показанных на рис. 5.38.

С ростом горизонта планирования приведенные затраты переналадок за один рабочий день на кривой 2 постепенно уменьшаются до величины, примерно равной 0,5 и далее колеблются относительно этого значения. Полезность выполняемого набора работ с ростом горизонта планирования колеблется относительно величины 0,6. Коэффициент группирования на кривой 3 постепенно повышается до величины 2, а затем колеблется относительно этой величины.

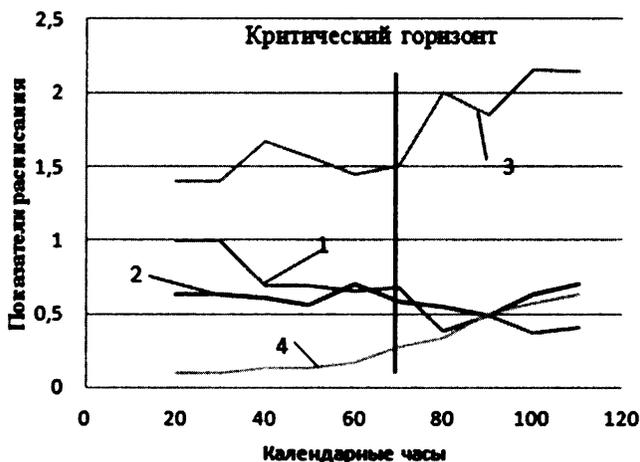
```

Tr = 0 ' начальное значение трудоемкости на горизонте планирования
For i = 1 To Beta 'наполнение массивов работ '
...
p(i) = Cells(Alfa, Gamma + 1).Value 'трудоемкость работы
p(i) = p(i) * (1 - Ek(i) / 100) 'остаточная трудоемкость
If d(i) <= HGot Then 'если срок выполнения работы в календарных часах меньше горизонта планирования
    Tr = Tr + p(i) ' накопленная трудоемкость на горизонте планирования
End If
...
Next i
...
For i = 1 To n 'цикл по выходным вариантам'
k = TreeStage(VarNumber(i)) ' номер последнего узла выходного варианта
U0 = Round(U(k), 3) 'относительная трудоемкость наладки
If Cells(1, "Y").Value = 1 Then 'если есть моделирование
    U0 = Round(U0 / Tr * E, 3) 'приведенные затраты на один рабочий день
End If
V0 = Round(V(k), 3) 'полезность выполненного расписания на горизонте планирования
G0 = Round(Kg(i), 1) 'коэффициент группирования расписания
Result = "Вариант " & i & ": " & "U = " & U0 & "; V = " & V0 & "; " & "Kg = " & G0
Cells(Alfa + 4 + i, Gamma + 2).Value = Result
Next i
    
```

Рис. 5.42 Определение характеристик расписания

Коэффициент запаздывания (кривая 4) с ростом горизонта планирования постепенно растет. При переходе к горизонту, равному 80, в планируемый набор включаются дополнительные работы 21 и 23 (рис. 5.40), требующие дополнительного времени. При этом происходит резко перегруппирование расписания и резкий рост коэффициента запаздывания.

Проведенный анализ свидетельствует о том, что в данном случае увеличение горизонта эффективно вплоть до значения, равного 70, поскольку оно приводит к уменьшению приведенных затрат с относительно небольшим падением полезности набора работ. При дальнейшем увеличении горизонта запаздывание заказов с ростом горизонта планирования резко нарастает. Поэтому горизонт в 70 календарных часов становится в данном случае критическим значением при составлении расписания, и его целесообразно установить в качестве планового значения.



**Рис. 5.43** Параметры расписания для разных горизонтов: 1 – приведенные затраты переналадок за один рабочий день; 2 – полезность выполняемого набора работ; 3 – коэффициент группирования; 4 – коэффициент запаздывания.

## 5.10 Планирование и перепланирование при выполнении работ с большой длительностью

На листе 6 в табл. 5.4 находится задание (рис. 5.1), состоящее из пяти работ значительной трудоемкости трех различных видов. Начальная настройка машины установлена на вид работы 3, момент освобождения равен 0. На листе приведены нормы на переналадку в часах и календарный график при трехсменной работе. Полагается, что в первый рабочий день работают все три смены по 8 часов. Следующий день считается предвыходным и в нем работают 2 смены, после чего наступает выходной день. Затем в следующий рабочий день первая смена начинает работать в 8 часов, после чего заступают следующие смены.

Планирование на листе 6 приводит к двум вариантам, показанным на рис. 5.44.

Допустим, что в качестве основного варианта выбран вариант 1, рекомендуемый как методом Сэвиджа, так и методом Гурвица (рис. 5.45).

**Недоминируемые варианты**

**Вариант 1: 1, 2, 4, 3,5**

**Вариант 2: 2, 1,5,3, 4**

**Рис. 5.44** Результаты расчета расписания

<b>План обработки по варианту 1 в календарных часах</b>
<b>2 (1) 12; 14 (2) 32; 34 (4) 89; 91 (3) 106; 106 (5) 118;</b>

**Рис. 5.45** План обработки в календарных часах

В соответствии с планом на рис. 5.45, машина из исходного состояния в момент 12.10.2016 0:00 часов переналаживается на работы вида 1, и в момент 2 часа ночи начинается выполнение работы 1. Согласно плану, эта работа должна быть закончена в 12 часов дня и в 14 часов начинается выполнение работы 2.

Допустим, что к концу первого дня планирования в цех поступает срочная работа 6, которую необходимо выполнить к 24 часам, т.е. к концу первого календарного дня. Поскольку план первого дня уже успешно выполняется, принимается решение о продолжении работы 2 вплоть до ее окончания и последующем перепланировании расписания на момент 13.10.2016 8:00.

После подготовки к перепланированию задание на 13.10.2016 имеет вид, показанный на рис. 5.46.

В результате перепланирования программа отбирает два недоминируемых варианта. Допустим, что выбирается вариант 1, соответствующий рекомендациям по Гурвицу и Сэвиджу. На рис. 5.47 приведен план этого расписания.

В соответствии с планом работы на 12.10.2016, машина должна закончить работу 2 вида 2 в момент 8 часов 13.10.2016. После этого должна быть проведена переналадка с вида 2 на вид 3 продолжительностью 2 часа.

В первый день плана, составляемого на 13.10.2016 длительность рабочего времени составляет 16 часов. Поскольку выполнение работы 6 с полной трудоемкостью 16 часов начинается в

№ работы	Трудоемкость работы н/час	Требуемый момент готовности, календ. часы	Ожидаемый момент поступления, календ. часы	Вид работы	Весовой коэффициент	Выполнение, %
3	15	28	0	1	1	0
4	23	56	6	3	1	60
5	12	82	16	1	1	0
6	16	0	0	3	3	0

**Рис. 5.46** Таблица задания на перепланирование

**План обработки по варианту 1 в календарных часах**  
**10 (6) 58; 60 (3) 75; 75 (5) 87; 90 (4) 99,2;**

**Рис. 5.47** Расписание обработки в календарных часах, начиная от 13.10.2016 0:00

10 часов утра, то в конце рабочего дня остается выполнить еще объем работы длительностью 2 час. Этот объем работы система переносит на время после выходного дня, т.е. на 15.10.2016.

Поскольку первая смена в этот день начинается в 8 часов, то работа 6 может быть окончена в момент 15.10.2016 10:00, т.е. в момент 58 часов календарного времени, отсчитанного от начала планирования в 13.10.2016 0:00. Последующие работы расписания данного примера выполняются в круглосуточном режиме с перерывами на переналадку, когда это необходимо. В конце расписания выполняется остаток работы 4, составляющий 40% от 23 часов, т.е. 9,2 часа.

## Расписание для одиночной машины с группами одновременно выполняемых работ

6.1 Введение .....	105	6.5 Блок-схема программы .....	110
6.2 Исходные данные для группового выполнения работ на одиночной машине .....	106	6.6 Листинг основной части программы .....	110
6.3 Работа с программой .....	106	6.7 Перепланирование расписания .....	118
6.4 Анализ результатов планирования .....	108	6.8 Моделирование расписания .....	120

### 6.1 Введение

Группа работ может стать одной партией изготовления, если выполнение всех этих работ осуществляется одновременно на одной машине (печи, ванне). В этом случае все работы, включенные в группу, подвергаются обработке с одинаковыми режимами, и, соответственно, могут рассматриваться как работы одного вида. При переходе к работам другого вида режимы обработки должны изменяться и машина должна переналаживаться, что приводит к дополнительным затратам на переналадку. При планировании параллельно-последовательного выполнения работ, существенное значение имеет учет размеров (объема) каждой работы, входящей в группу для расчета полного объема группы. Этот объем должен быть меньше, чем рабочий объем машины.

В реальной практике составления рабочих заданий для машины (печи) с одновременным выполнением нескольких работ, перечень этих работ обычно задается с небольшим горизонтом, но задания часто включают работы, относящиеся к нескольким различным видам технологических процессов. В данном случае классификационная формула имеет вид

$$1|b, batch, nmit, r_i, d_i, s_{fq}|U, \bar{V}, \tag{6.1}$$

где параметр  $b$  свидетельствует об ограниченной емкости машины, параметр  $batch$  означает, что расписание должно составляться с использованием партий загрузки, состоящих из нескольких работ; параметр  $nmit$  – требование отсутствия перерывов при обработке партии. При этом простаивание машины между партиями загрузки допускается. Положим также, что продолжительность выполнения работ одного вида одинакова. Остальные параметры выражения 6.1 совпадают с параметрами в формуле 5.1.

Так же, как в главе 5, программа представляет собой макрос на языке VBA для электронной книги MS Excel. Рабочее задание записывается на листе MS Excel; после выполнения программы результат записывается этом же листе и на формах книги.

## 6.2 Исходные данные для группового выполнения работ на одиночной машине

Исходные данные для составления расписания настоящей задачи записываются на листе MS Excel электронной книги MBook2.xls. Эта книга в состоянии поставки состоит из пяти листов, на которых иллюстрируются различные аспекты составления расписаний.

На листе 1 в табл. \$A\$4:\$G\$12 находится простейшее задание, состоящее из девяти работ двух различных видов. В каждой строке задания описываются параметры работ:

- номер работы;
- вид работы;
- требуемый момент готовности в календарных часах;
- ожидаемый момент поступления заготовки в календарных часах;
- физический объем работы в литрах;
- весовой коэффициент работы и выполнение работы в процентах.

В табл. \$L\$5:\$N\$6 приведены значения процессного времени в часах для каждого вида работы и нормы времени в часах на переналадку машины с одного вида работы на другой. Как обычно, полагается, что номер предыдущего вида работы устанавливается по столбцу таблицы, а номер последующего вида работы – по строке таблицы. В табл. \$\$S\$15:\$AB\$18 описан календарный график работы машины по дням, начинающийся с первого дня выполнения составляемого расписания. В примере предусматривается возможность двухсменной работы с 8-часовыми сменами. В предвыходные дни возможно укорочение работы второй смены. В день, следующий после выходного, начало первой смены совпадает с началом работы цеха – обычно, 8 часов.

Основные параметры процесса планирования во второй строке листа несколько отличаются от аналогичных параметров в книге MBook1. Если в начале рабочего дня машина (печь) считается остановленной, то для запуска необходимо некоторое время начальной подготовки. Если работа машины круглосуточная, в начале нового дня планирования необходимо указать время освобождения машины и номер вида работы. Если машина останавливается, полагается, что ее вид работы равен 0.

Параметры в первой строке имеют то же назначение, что и в предыдущей главе. Работа данной программы, как и остальных программ, описываемых в этой книге, целиком основана на методе планирования по критериям издержек  $U$  и средней полезности выполнения заказов  $\bar{V}$ , изложенных в п. 3.4.2 и п. 3.4.1.

На листе 2 приведен пример задания для 25 работ четырех различных видов, а на листе 3 – возможный вариант перепланирования этого задания. На листе 4 находится задание для 30 работ с четырьмя возможными видами работ. Для этого примера проводится моделирование по различным параметрам. На листе 5 приведен пример моделирования 30 работ с целью нахождения рационального горизонта планирования.

## 6.3 Работа с программой

Для работы с программой планирования в MS Excel устанавливается соответствующий рабочий лист, например, лист 1 и осуществляется команда Макросы/Utility2/Выполнить. При нажатии кнопки «Запуск программа» программа начинает работать аналогично программе в MBook1. При выборе опции «без моделирования», система сообщает о последней дате планирования и предлагает одну из двух возможностей – подготовку планирования с новой датой

или повторение расчета с последней датой. В случае расчета расписания без перехода на новую дату открывается форма «Ввод данных» (рис. 6.1).

Форма на рис. 6.1, в основном, совпадает с формой на рис. 5.3. Отличие состоит в том, что в первом ряду формы на рис. 6.1 выводится поле рабочего объема машины. Кроме того, в третьем ряду формы указывается значение длительности начальной подготовки машины.

Система, как и в остальных программах этой книги, автоматически рассчитывает загрузку машины и выдает соответствующее сообщение. По окончании расчета все возможные и не доминируемые варианты выводятся на экран (рис. 6.2).

В каждом варианте совместно выполняемые работы записаны в виде соответствующих групп, которые разделены пробелами. В рассматриваемом примере в первом варианте расписания сначала выполняется группа работ 2,3, а затем три группы работ разного вида. Первая из этих состоит из четырех работ, вторая из одной работы, а последняя – из двух работ. Во втором варианте также должны выполняться 4 группы работ, но их порядок существенно отличен.

Дальнейшая работа пользователя, как и ранее в главе 5, заключается в выборе из предлагаемого набора одного варианта, наиболее рационального с точки зрения пользователя. Для этого система выводит на экран форму «Принятие решений», приведенную выше на рис. 5.6. Для определения рекомендуемых решений в программе используются методы принятия решений Сэвиджа и Гурвица [Мауэргауз, 2012].

По окончании расчета на экран выводятся номера вариантов, рекомендуемые в соответствии с методами Сэвиджа и Гурвица. Кроме того, для всех не доминируемых вариантов выводятся данные о значениях критериев  $U$ ,  $\bar{V}$  (рис. 6.3), а также значения коэффициентов группирования  $Kg$ , коэффициента использования рабочего объема машины  $Kv$ , коэффициента запаздывания

Полюсовый коэффициент	Длительность планового периода в днях	Количество рабочих смен	Стоимость рабочей смены	Стоимость нормочаса наладки	Стоимость нормочаса простоя	Рабочий объем машины, л
0,1	3	2	8	1	0	120
Имя первой ячейки списка работ	Имя последней ячейки списка работ	Имя первой ячейки времени переналадки	Имя последней ячейки времени переналадки	Имя первой ячейки календаря	Имя последней ячейки календаря	
A4	G12	L5	N6	S15	AB18	
Имя первой ячейки результата расчета	Начало работы первой смены	Момент освобождения машины	Начальная настройка на вид работы	Длительность начальной подготовки в часах	Момент планирования	
D20	8	0	0	2	12.10.16 8:00	
Текущие параметры	Ввод данных в Excel	Запуск программы	Выход из программы			
OK	OK	OK	OK			

Рис. 6.1 Форма ввода параметров задачи (данные для листа 1)

#### Недоминируемые варианты

Вариант 1: 2,3 1,4,6,8 5 7,9

Вариант 2: 1,4,6 5,8 2,3 7,9

Рис. 6.2 Результаты работы программы на листе 1

$Kz$ , полной длительности выполнения расписания  $Stax$ , среднего  $Tc$ , наименьшего  $Tmin$  и наибольшего  $Tmax$  запаздываний.

Коэффициент главной загрузки 0,9
Рекомендуемые варианты: по методу Сэвиджа - вариант 1, по методу Гурвица - вариант 1
Показатели вариантов расписаний:
относительные затраты на наладку набора работ $U$ ; средняя полнота заказа $V$ ; коэффициент группирования $Kg$ ; коэффициент использования объема $Kv$ ; коэффициент запоздания $Kz$ ; полное машинное время $Wp$ в рабочих часах; полная длительность выполнения $Stax$ , среднее $Tc$ и наибольшее $Tmax$ запоздания в календарных часах
Вариант 1: $U = 2,25$ ; $V = 0,224$ ; $Kg = 2,25$ ; $Kv = 0,25$ ; $Kz = 0,89$ ; $Wp = 20$ рабочих часов; $Stax = 45$ ; $Tc = 13,6$ ; $Tmin = 0$ ; $Tmax = 25$ календарных часов
Вариант 2: $U = 2,125$ ; $V = 0,515$ ; $Kg = 2,25$ ; $Kv = 0,29$ ; $Kz = 0,78$ ; $Wp = 20$ рабочих часов; $Stax = 46$ ; $Tc = 15,3$ ; $Tmin = 0$ ; $Tmax = 32$ календарных часов

Рис. 6.3 Значения показателей расписания для различных вариантов

## 6.4 Анализ результатов планирования

Для анализа расписания для машин типа печи и т.п. (рис. 6.3) программа предоставляет несколько показателей, один из которых отсутствует в главе 5 (рис. 5.7). Эти показателем является средний коэффициент использования объема  $Kv$ , который обычно растет одновременно с ростом коэффициента группирования  $Kg$ . В данном случае коэффициент запоздания  $Kz$  иногда может быть равен 1, т.е. все работы являются запаздывающими. Для более полной оценки качества расписания в таком случае, программа выводит не только значения среднего и максимального запаздываний, но и минимального запаздывания.

Для расчета плана по анализируемому варианту система предлагает форму «Расчет плана», приведенную выше на рис. 5.8. В окно «Номер варианта» этой формы вводится номер рассчитываемого варианта. Рассмотрим рекомендуемый методами Сэвиджа и Гурвица вариант 1. При расчете плана (рис. 6.4) учитываются величина рабочего объема машины, моменты поступления работ, процессное время соответствующего вида, нормы времени на переналадку, а также рабочий календарь. Как везде в настоящей книге, числа перед скобками соответствуют планируемому моментам начала работы в календарных часах, отсчитываемых от начала первых суток выполняемого расписания; числа после скобок соответствуют моментам окончания работы. В скобках записываются номера совместно выполняемых работ.

В приведенном примере рабочий объем машины равен 120 литров. После начала работы машины в 8 часов, производится начальная подготовка, заканчивающаяся в 10 часов. Затем обрабатывается в течение 6 часов первая партия загрузки, состоящая из работ 2,3 одинакового вида 2, имеющая суммарный объем, равный 90 литров (MBook2, лист 1). После переналадки машины на работы вида 1, продолжавшейся 2 час, в течение 4 часов выполняется обработка партии из четырех работ 1,4,6,8 с суммарным объемом в 120 литров. Следует обратить внимание на плановое прекращение работ в момент 22 час, хотя рабочий день, вообще говоря, продолжается до 24 часов. Причина такого прекращения состоит в том, что длительность непрерывной обработки для работы 5 составляет 4 часа, что не вписывается в текущую смену.

План обработки по варианту 1			
10	(2,3)	16; 18	(1,4,6,8) 22; 34 (5) 38; 39 (7,9) 45;

Рис. 6.4 План обработки

В течение следующего рабочего дня снова производится подготовка машины и очередная партия начинает обработку в 34 часа. Для выполнения последней партии загрузки машина снова переналаживается и останавливается в 45 часов.

Система обеспечивает вывод расписания работы машины в виде диаграммы Ганта аналогично программе в Главе 5. Как видно из рис. 6.5, над каждой партией загрузки приводится соответствующая группа совместно выполняемых работ.

Заметим, что выбор варианта, рекомендуемого по методу Сэвиджа или методу Гурвица, далеко не всегда является наиболее удачным. В качестве примера рассмотрим варианты расписания для данных на листе 2 в книге MBook2. В этом случае расчет приводит к восьми недоминируемым вариантам, показанным на рис. 6.6. На рис. 6.7 приведены показатели расписания для соответствующих вариантов.

В данном случае метод Сэвиджа, рекомендует выбрать расписание по варианту 6, а метод Гурвица – по варианту 5. Выберем, например, расписание по варианту 5.

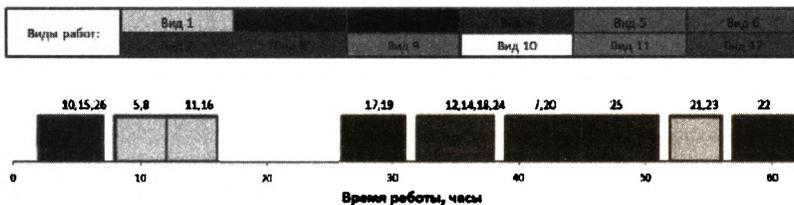


Рис. 6.5 Диаграмма Ганта

Недоминируемые варианты																
Вариант 1:	1,4,5	6	2,9	3,7	13	20	8,11,16	10,15,17	12,14,18,24	19,22	21,23	25				
Вариант 2:	1,4,5	6	2,9	3,7	13	20	8,11,16	10,15,17	12,14,18,24	21,23	19,22	25				
Вариант 3:	1,4,5	6	2,9	3,7	13	20	8,11,16	12,14,18	24	10,15,17	19,22	21,23	25			
Вариант 4:	1,4,5	6	2,9	3,7	13	20	8,11,16	12,14,18	24	10,15,17	19,22	25	21,23			
Вариант 5:	1,4,5	6	2,9	3,7	13	20	8,11,16	12,14,18	24	21,23	10,15,17	19,22	25			
Вариант 6:	1,4,5	6	8	11	2,3	7,13	10,15	17,19	9,25	20	22	12,14,18,24	16,21,23			
Вариант 7:	1,4,5	6	8	11	16	12	14,18	2,3	7,25	9,13	10,15,17	19,22	20	21,23	24	
Вариант 8:	1,4,5	6	8	11	16	12	14,18	21	24	23	2,3	7,9	10,15,17	13,20	19,22	25

Рис. 6.6 Недоминируемые варианты расписания на листе 2

Коэффициент плановой загрузки: 0,8  
 Рекомендуемые варианты: по методу Сэвиджа - вариант 6, по методу Гурвица - вариант 5  
 Показаны варианты расписания  
 относительные затраты на подготовку работ U; средняя полнота заказов V; коэффициент группировки K<sub>г</sub>; коэффициент использования объема K<sub>в</sub>; коэффициент загрузочности K<sub>з</sub>; полное машинное время W<sub>р</sub> в рабочих часах; полная длительность выполнения S<sub>мах</sub>; среднее T<sub>с</sub> и наибольшее T<sub>мах</sub> задерживания в календарных часах  
 Вариант 1: U = 0,875; V = 0,033; K<sub>г</sub> = 2,08; K<sub>в</sub> = 0,41; K<sub>з</sub> = 0,92; W<sub>р</sub> = 62 рабочих часов; S<sub>мах</sub> = 113; T<sub>с</sub> = 23,4; T<sub>мах</sub> = 60 календарных часов  
 Вариант 2: U = 0,625; V = 0,029; K<sub>г</sub> = 2,08; K<sub>в</sub> = 0,4; K<sub>з</sub> = 0,92; W<sub>р</sub> = 62 рабочих часов; S<sub>мах</sub> = 112; T<sub>с</sub> = 23,2; T<sub>мах</sub> = 60 календарных часов  
 Вариант 3: U = 0,625; V = -0,094; K<sub>г</sub> = 1,92; K<sub>в</sub> = 0,4; K<sub>з</sub> = 0,92; W<sub>р</sub> = 68 рабочих часов; S<sub>мах</sub> = 118; T<sub>с</sub> = 25,2; T<sub>мах</sub> = 73 календарных часов  
 Вариант 4: U = 0,5; V = -0,189; K<sub>г</sub> = 1,92; K<sub>в</sub> = 0,41; K<sub>з</sub> = 0,92; W<sub>р</sub> = 68 рабочих часов; S<sub>мах</sub> = 117; T<sub>с</sub> = 25,5; T<sub>мах</sub> = 73 календарных часов  
 Вариант 5: U = 0,375; V = -0,158; K<sub>г</sub> = 1,92; K<sub>в</sub> = 0,4; K<sub>з</sub> = 0,92; W<sub>р</sub> = 68 рабочих часов; S<sub>мах</sub> = 117; T<sub>с</sub> = 25,2; T<sub>мах</sub> = 79 календарных часов  
 Вариант 6: U = 0,25; V = -0,633; K<sub>г</sub> = 1,92; K<sub>в</sub> = 0,47; K<sub>з</sub> = 0,92; W<sub>р</sub> = 66 рабочих часов; S<sub>мах</sub> = 119; T<sub>с</sub> = 29,5; T<sub>мах</sub> = 80 календарных часов  
 Вариант 7: U = 0,25; V = -1,86; K<sub>г</sub> = 1,67; K<sub>в</sub> = 0,5; K<sub>з</sub> = 0,88; W<sub>р</sub> = 76 рабочих часов; S<sub>мах</sub> = 131; T<sub>с</sub> = 35,9; T<sub>мах</sub> = 0; T<sub>мах</sub> = 82 календарных часов  
 Вариант 8: U = 0,125; V = -2,54; K<sub>г</sub> = 1,56; K<sub>в</sub> = 0,52; K<sub>з</sub> = 0,88; W<sub>р</sub> = 88 рабочих часов; S<sub>мах</sub> = 138; T<sub>с</sub> = 40,2; T<sub>мах</sub> = 0; T<sub>мах</sub> = 99 календарных часов

Рис. 6.7 Показатели вариантов расписания

## 6.5 Блок-схема программы

Блок-схема программы состоит из тех же четырех основных частей, что блок-схема на рис. 5.13. В то же время, при определении недоминируемых узлов как первого, так и последующих уровней, программа включает механизмы формирования групп совместно выполняемых работ. На каждом уровне все возможные группы образуют совокупность узлов дерева решений, после чего эти узлы сравниваются по критериям  $U$ ,  $\bar{V}$ .

При формировании групп отдельные работы одного вида (требующие одинаковых параметров обработки) могут объединяться, если их суммарный физический объем не превышает рабочего объема машины. Если какая-нибудь из работ имеет объем, больший рабочего объема машины, то она может быть выполнена только при условии ее деления на несколько отдельных работ.

Процесс обработки в машинах рассматриваемого типа не может быть прерван и повторно запущен. Поэтому программа автоматически проверяет возможность начала каждого цикла обработки с тем, чтобы этот цикл закончился в течение текущего рабочего дня. Если времени на обработку недостаточно, цикл обработки автоматически переносится на следующий рабочий день.

## 6.6 Листинг основной части программы

На рисунках ниже приведены отдельные компоненты листинга программы. На рис. 6.8 описаны данные о переменных и массивах, действующих по всей программе. На каждом уровне построения дерева 4 массива  $UStage()$ ,  $VStage()$ ,  $ParStage()$ ,  $CompStage()$  имеют назначение, совпадающее с назначением аналогичных массивов в предыдущей главе. Массив  $NPStage()$  номеров строк работ в каждом узле может содержать несколько одновременно выполняемых работ, и поэтому имеет строковый тип. Надобность в использовании массивов  $Tk()$  и  $Commen()$  для записи моментов начала каждой работы, здесь отсутствует, т.к. обработка партии не прерывается, и момент начала выполнения партии загрузки всегда меньше момента окончания на величину процессного времени.

Кроме указанных пяти основных массивов, в описываемой программе необходимы массивы  $VidStage()$ ,  $YStage()$ ,  $GStage()$ ,  $MStage()$  и  $LStage()$  для запоминания значений вида работы, суммарного физического объема, возможного начала обработки, необходимого начала обработки и количества одновременно выполняемых работ в текущем узле. Семь массивов  $U()$ ,  $V()$ ,  $Par()$ ,  $Comp()$ ,  $NP()$ ,  $VP()$ ,  $YP()$  используются для дальнейшего построения ветвей дерева путем перезаписи значений параметров недоминируемых узлов, остающихся после отсека. Ниже глобальных переменных в программе описывается ряд вспомогательных локальных переменных и затем вызывается форма ввода параметров (рис. 6.1).

Для расчета загрузки машины в цикле по строкам работ накапливается продолжительность машинной обработки всего набора работ  $Wip$  (рис. 6.9). Для каждой  $i$ -ой работы эта величина (плановая загрузка) определяется по величине процессного времени соответствующего вида работ  $p(Vid(i))$  с учетом процента выполнения  $Ex(i)$  и доли рабочего объема машины, которая физически занимает текущая  $i$ -ой работа. Полный фонд времени  $Fond$  по всем работам на горизонте планирования устанавливается по строке с наибольшим резервом времени в рабочих часах. Коэффициент загрузки  $KWip$  определяется как частное от деления полной трудоемкости на фонд времени.

При моделировании коэффициент загрузки определяется в рамках установленного горизонта планирования. Соответственно, как фонд времени, так и накопленная загрузка подсчитываются

```

Option Base 1
Dim des() As Integer      'массив номеров работ'
Dim p() As Single        'массив процессного времени в часах непрерывной работы'
Dim dd() As Single       'массив требуемых моментов окончания в рабочих часах после начала планирования'
Dim d() As Single        'массив требуемых моментов окончания в календарных часах после начала планирования'
Dim qs() As Single       'массив требуемых дат начала в рабочих часах после начала планирования'
Dim z() As Single        'массив дат поступления в календарных часах после начала планирования'
Dim Vid() As Integer     'массив видов работ'
Dim W() As Single        'массив весов работ'
Dim Ex() As Integer      'массив меток выполнения'
Dim Metka() As Integer   'массив меток рабочих дней'
Dim Y() As Single        'массив физических объемов работы в литрах'
Dim s() As Single        'массив стоимости переналадок'
Dim GMass() As Single    'массив координат графика'
Dim G As Single, a As Single 'длительность планового периода, психологический коэфф.'
Dim c As Single, CP As Single, CH As Single 'стоимость смены, стоимость нормчасе просто, стоимость нормчасе наладки
Dim Delta As Integer     'количество дней в календаре'
Dim E() As Single        'массив длительности рабочего дня'
Dim Tn As Single, Tr As Single 'момент начала первой смены в часах, длительность начальной подготовки машины'
Dim K0 As Single 'момент освобождения машины - начала первого дня планирования'
Dim Vid0 As Integer      'вид работы в начальный момент'
Dim C1 As Single, Tk As Single 'момент окончания работы, момент начала работы'
Dim ad() As Single       'массив меток выполнения работ'
Dim U() As Single, V() As Single 'массивы функции затрат и функции полезности заказов, недоиспользуемые узлы всех уровней'
Dim Pax() As Integer     'массив номеров родительских узлов для недоиспользуемых узлов всех уровней'
Dim Comp() As Single     'массив моментов окончания работ для недоиспользуемых узлов всех уровней'
Dim Number() As Integer  'массив номеров, предшествующих парам узлам в уровнях'
Dim NP() As String       'полный массив строк работ недоиспользуемых узлов'
Dim VP() As Integer      'полный видов работ в группах'
Dim YP() As Integer      'полный массив объемов групп'
Dim YStage() As Single   'массив текущих объемов групп'
Dim UStage() As Single, VStage() As Single 'массивы функции затрат и функции полезности заказов на текущем уровне'
Dim ParStage() As Integer 'массив номеров родительских узлов на текущем уровне'
Dim CompStage() As Single 'массив моментов окончания работ на текущем уровне'
Dim NPStage() As String  'массив номеров строк работ в узлах на текущем уровне'
Dim VidStage() As Integer 'массив видов групп'
Dim GStage() As Single   'массив возможного начала работы с группой'
Dim MStage() As Single   'массив необходимого начала работы с группой'
Dim LStage() As Integer  'массив количества выполненных работ'
Dim intY As Integer, intZ As Integer 'уровень дерева, узел'
Dim InstSheet As Worksheet

```

Рис. 6.8 Глобальные переменные программы

в пределах этого горизонта. Количество рабочих часов в заданном сроке для каждой работы определяется с помощью функции  $WorkHours(d(i))$ .

После подготовки исходных массивов рассчитываются значения исходных значений критериев в корне дерева. Величина относительных затрат в корне  $U_0 = 0$ , функция полезности заказов  $\bar{V}_0$  определяется с помощью функций  $Napr2()$  и  $Napr1()$ .

Важнейшей частью описываемой программы является механизм формирования групп совместно выполняемых работ. На рис. 6.10 приведен фрагмент начала формирования групп для формирования узлов первого уровня. Программа включает внешний цикл  $i$  по видам работ и внутренний цикл  $j$  по списку заданных работ. Для каждой незаконченной работы текущего вида устанавливается возможный момент начала ее выполнения  $Tk$ . На первом уровне этот момент, прежде всего, определяется временем начала рабочего дня и длительностью начальной подготовки машины. После этого момент начала выполнения с помощью функции  $Arrival()$  проверяется по поступлению текущей работы на машину, а также с помощью функции  $Commence()$  – на возможность выполнения в течение текущего или последующего рабочего дня.

При формировании каждой новой или пополняемой группы номеруется новый  $n$ -ый узел и добавляются элементы массивов  $NPStage$ ,  $GStage$  и  $MStage$  (рис. 6.11). Если физический объем работы, добавляемой к уже запланированной работе, это позволяет, создается еще один узел, содержащий несколько одновременно выполняемых работ. Если объема машины недостаточно, чтобы добавить еще одну работу к ранее запланированным для совместного выполне-

```

Wip = 0 'начальное значение загрузки'
Fond = 0 'начальное значение резерва времени'
Tr = 0 'начальное значение трудоемкости на горизонте планирования'
For i = 1 To Beta 'наполним массив работ'
...
If dd(i) > Fond Then
    Fond = dd(i) 'полный резерв времени всех заказов в рабочих часах'
End If
If Cells(1, "Y").Value = 0 Or (Cells(1, "Y").Value = 1 And d(i) <= HGor) Then
' учитывается фонд рабочего времени в пределах горизонта в календарных часах
    Wip = Wip + p(Vid(i)) * (1 - Ek(i) / 100) * Y(i) / sngV
' накопленная плановая загрузка в рабочих часах с учетом занимаемого объема
End If
...
Next i
If Cells(1, "Y").Value = 1 Then 'при моделировании
    Fond = Gor 'фонд времени равен рабочим часам на горизонте планирования.
End If
KWip = Round(Wip / Fond, 1) 'загрузка машин

```

Рис. 6.9 Расчет коэффициент загрузки

```

n = 0 'начальное количество узлов на первом уровне'
Flag = 0 'флаг возврата к наполнению предыдущих групп'
For i = 1 To BetaVid 'цикл по видам работ'
    k = 0 'начальный объем группы'
    For j = 1 To Beta 'цикл по работам'
        If Ek(i) < 100 And (Cells(1, "Y").Value = 0 Or (Cells(1, "Y").Value = 1 And d(i) <= HGor)) Then
' для незаконченных работ на горизонте
            If Vid(j) = i Then 'для работ текущего вида'
                If Vid0 > 0 Then 'при круглосуточной работе
                    Tk = K0 + s(i, Vid0) 'возможное начало первой работы
                Else 'если число рабочих часов в день меньше 24 (вид работы выставлен в 0)
                    Tk = Tn + Tr 'первая работа начинается после начальной подготовки
                End If
                sngDur = Arrival(r(j)) 'момент поступления работы на станку
                If sngDur > Tk Then 'учет времени поступления заготовки (материала)
                    Tk = sngDur 'возможный момент начала работы станком в календарных часах
                End If
                Exec = Tk
                Tk = Commence(Tk, p(i)) 'возможный момент начала работы станком в календарных часах
                If Tk = 0 And Exec > 0 Then
                    MsgBox "Превышается длительность календаря"
                End Sub
            End If
        ...
        ReDim Preserve YStage(n)
        ReDim Preserve VidStage(n)
        YStage(n) = k 'запоминание объема в группе'
        VidStage(n) = i 'запоминание вида группы'
    End If
End If
Next j
Next i

```

Рис. 6.10 Фрагмент начала формирования групп совместно выполняемых работ на первом уровне

ния, программа начинает проверять все ранее созданные группы на возможность выполнения текущей работы совместно с одной из этих групп. Если такая возможность осуществляется, устанавливается флаг дополнения групп в единицу. При отсутствии возможности выполнения текущей работы с запланированными ранее, программа создает новую группу. После организации каждого  $n$ -ого узла физический объем и вид работы запоминаются в массивах  $YStage$  и  $VidStage$  (рис. 6.10).

На рис. 6.12 приводится цикл расчета основных параметров всех созданных узлов первого уровня.

Для каждого  $i$ -ого узла первого уровня в массиве  $QP$  запоминается номер строки всех работ, совместно выполняемых в соответствующей группе. Каждой такой работе присваивается параметр обработки  $aJ = 0,5$ , что означает ее выполнение в текущем узле. Далее определяются моменты готовности машины к обработке  $Cl$  и ожидаемый момент окончания обработки текущей группы  $CompStage$ . Наличие этих данных позволяет определить величину полезности в узле  $VStage$ , а также трудоемкость  $UStage$  и номер родительского узла  $ParStage$ . В конце каждой итерации параметры обработки для текущей группы работ возвращаются в единицу.

Отсечение узлов по критериям производится в рамках двойного цикла (рис. 6.13). Отсечение проводится в соответствии с правилами, описанными в п.п. 3.4.1, 3.4.2 и 3.4.3. Оставшиеся ветви на первом уровне имеют метку  $MetCurStage(j) = 0$ . Отличие механизма отсечения на рис. 6.13 от фрагмента программы, приведенной выше в главе 5 на рис. 5.19, состоит в том, что сравнение по датам производится не непосредственно по массиву  $gs$  необходимых моментов начала каждой работы, а по массиву  $MStage$  необходимых моментов начала для всей группы одновременно выполняемых работ.

Оставшиеся ветви пересчитываются и переносятся в семь массивов недоминируемых узлов дерева решений, которые были перечислены выше. На последующих уровнях построения дерева решений все этапы программы первого уровня повторяются с учетом параметров ограничения вариантов по длительности согласно п. 3.4.4. Механизм этих ограничений подробно описан в главе 5 (рис. 5.21 и 5.22). Отсечение узлов по критериям производится аналогично отсечению на первом уровне. Отличие состоит в том, что при исчерпании всех возможных работ программа должна автоматически остановиться и выдать полученные варианты расписания.

Полученные варианты решений сортируются по убыванию значения функции полезности заказов. Для каждого  $i$ -ого варианта в массиве  $WP$  накапливается процессное время работы машины. Одновременно в массиве  $MStage$  записывается плановый момент выполнения каждой работы (рис. 6.14). По полученным данным программа определяет значения основных параметров для каждого варианта (рис. 6.15).

Для полученного набора вариантов проводится поиск наиболее целесообразного варианта методами Сэвиджа и Гурвица, полученные результаты печатаются на листе MS Excel. Для выбранного варианта осуществляется запись его расписания в календарных часах. Параллельно создается массив исходных данных для построения диаграммы Ганта в рабочих часах.

```

If k = 0 Then          'начало формирования группы'
  n = n + 1          'создание узла '
  ReDim Preserve NPStage(n)
  ReDim Preserve GStage(n)
  ReDim Preserve MStage(n)
  NPStage(n) = CStr(j) 'номер строки в узле
  GStage(n) = Tk      'возможный момент начала работы в узле
  MStage(n) = qs(j)   'необходимый момент начала работы в узле
  k = Y(j)            'объем первой работы в группе'
Else
  k = k + Y(j)        'возможный объем в группе'
  If k <= snqV Then   'проверка объема'
    n = n + 1        'создание узла '
    ReDim Preserve NPStage(n)
    ReDim Preserve GStage(n)
    ReDim Preserve MStage(n)
    NPStage(n) = NPStage(n - 1) & ", " & CStr(j) 'состав группы'
    GStage(n) = Application.Max(GStage(n - 1), Tk) 'момент начала работы в узле
    MStage(n) = Application.Min(MStage(n - 1), qs(j)) 'необходимый момент начала работы в узле
  Else
    For l = n - 1 To 1 Step -1 'поиск подходящей ранее созданной группы для дополнения текущей работой
      If VidStage(l) = i Then 'для группы текущего вида'
        k = YStage(l) + Y(j) 'возможный объем в группе с дополнением'
        If k <= snqV Then 'проверка объема и прихода работы'
          n = n + 1 'создание узла '
          ReDim Preserve NPStage(n)
          ReDim Preserve GStage(n)
          ReDim Preserve MStage(n)
          NPStage(n) = NPStage(l) & ", " & CStr(j) 'состав группы с дополнением'
          GStage(n) = Application.Max(GStage(l), Tk) 'момент начала работы в узле
          MStage(n) = Application.Min(MStage(l), qs(j)) 'необходимый момент начала работы в узле
          Flag = 1 'установка флага дополнения'
          l = 1 'выход из цикла поиска'
        End If
      End If
    Next l
    If Flag = 0 Then 'проверка флага дополнения групп'
      n = n + 1 'создание узла с новой группой'
      ReDim Preserve NPStage(n)
      ReDim Preserve GStage(n)
      ReDim Preserve MStage(n)
      NPStage(n) = CStr(j)
      GStage(n) = Tk 'момент начала работы в узле
      MStage(n) = qs(j) 'необходимый момент начала работы в узле
      k = Y(j) 'объем первой работы в группе'
    Else
      Flag = 0 'возвращение флага в исходное положение'
    End If
  End If
End If

```

Рис. 6.11 Основной фрагмент формирования групп совместно выполняемых работ на первом уровне

```

intU = n                'количество узлов первого уровня'
For i = 1 To intU      'расчет полезности заказов на первом уровне'
    l = 0              'порядковый номер работы в группе'
    Temp = NPStage(i)  'строка работ в группе'
    Shift = InStr(Temp, ",") 'установка позиции первой работы'
    Do While Shift > 0
        ResSort = Left(Temp, Shift - 1) 'выделение номера работы'
        l = l + 1
        QP(l) = CInt(ResSort) 'номер строки выделенной работы'
        aJ(QP(l)) = 0.5       'установка параметра обработки'
        Temp = Right(Temp, Len(Temp) - Shift) 'пересопределение остатка последовательности'
        Shift = InStr(Temp, ",") 'установка позиции следующей работы'
    Loop
    l = l + 1           'для последней работы в группе'
    QP(l) = CInt(Temp) 'номер строки последней работы в группе'
    aJ(QP(l)) = 0.5   'установка параметра обработки последней работы в группе'
    Cl = Tn + Tr
    CompStage(i) = GStage(i) + p(VidStage(i)) 'момент окончания работы в календарных часах'
    If CompStage(i) = 0 Then 'если не определен момент окончания работы
        MsgBox " недостаточен рабочий горизонт "
        Exit Sub
    End If
    VStage(i) = (V0 * Cl + VZak(Beta, VidStage(i), Cl, GStage(i), CompStage(i))) / CompStage(i)
    'полезность набора работ
    If Vid0 > 0 Then 'если начальная установка машин определена
        UStage(n) = UZak(i, 0, Vid0) 'трудоемкость начальной наладки
    Else 'если начальная установка машин не установлена
        UStage(i) = Tr 'трудоемкость начального запуска машин
    End If

    Zind(i) = 0      'номер исходящего узла для текущего уровня
    ParStage(i) = 0  'номер родительского узла в дереве решений
    For j = 1 To l
        aJ(QP(j)) = 1 'возврат параметров обработки'
    Next j
Next i

```

Рис. 6.12 Фрагмент программы по расчету параметров узла на первом уровне

```

Number(i) = 0          'узел перед первым'
intN = intU           'начальное возможное количество узлов разветвления на первом уровне'
For j = intU To 1 Step -1 'нахождение недоиспользуемых узлов первого уровня'
    MetCurStage(j) = 0
    For i = 1 To intU
        If i <> j Then
            If UStage(j) >= UStage(i) And VStage(j) <= VStage(i) And MStage(j) >= MStage(i) Then
                'условие доминирования на первом уровне'
                intN = intN - 1 'количество разветвляемых узлов первого уровня'
                MetCurStage(j) = 1 'метка доминирования над текущей работой'
                i = intU 'выход из цикла'
            End If
        End If
    Next i
Next j

```

Рис. 6.13 Фрагмент программы для механизма отсеечения первого уровня

```

k = VarNumber(i) 'последний узел варианта'
Result = " " 'выходная строка номеров работы в последнем узле'
ResSort = " "
Temp = NP(k) 'переменная лексема
Shift = InStr(Temp, ",") 'положение запятой в лексеме
Do While Shift > 0 'цикл до последней работы в лексеме
    Job = CInt(Left(Temp, Shift - 1)) 'номер строки работы'
    ResSort = ResSort & Trim(Str(des(Job))) & ", " 'строка работ в последней группе
    MStage(Job) = Comp(k) 'момент выполнения работы
    Temp = Right(Temp, Len(Temp) - Shift) 'остаток лексемы
    Shift = InStr(Temp, ",") 'положение запятой в остатке лексемы
Loop
Job = CInt(Temp) 'последняя работа
ResSort = ResSort & Trim(Str(des(Job)))
Result = ResSort
MStage(Job) = Comp(k) 'момент выполнения работы
n = 1 'последняя группа
WF(1) = p(VF(k)) 'процессное время последней группы
Exec = YP(k) 'физический объем последней группы
Do Until Par(k) = 0 'цикл по цепочке дерева
    k = Par(k) 'родительский узел
    n = n + 1 'количество групп
    WF(1) = WF(1) + p(VF(k)) 'накопленная продолжительность обработки
    Exec = Exec + YP(k) 'накопленный объем
    ResSort = " "
    Temp = NP(k) 'переменная лексема
    Shift = InStr(Temp, ",") 'положение запятой в лексеме
    Do While Shift > 0
        Job = CInt(Left(Temp, Shift - 1)) 'номер строки работы'
        ResSort = ResSort & Trim(Str(des(Job))) & ", " 'наполнение строки работами
        MStage(Job) = Comp(k) 'момент выполнения работы
        Temp = Right(Temp, Len(Temp) - Shift) 'остаток лексемы
        Shift = InStr(Temp, ",")
    Loop
    Job = CInt(Temp) 'последняя работа
    ResSort = ResSort & Trim(Str(des(Job)))
    Result = ResSort & " " & Result
    MStage(Job) = Comp(k) 'момент выполнения работы
Loop

```

Рис. 6.14 Определение плановых моментов окончания работ

```

Exec = 0
maxV = 0
m = 0
For j = 1 To Beta
  sngDur = MStage(j) - d(j) 'отклонение от заданного срока
  If j = 1 Then
    minV = sngDur 'запоминание первого отклонения
  End If
  If sngDur > 0 Then 'для запаздываний
    Exec = Exec + MStage(j) - d(j) 'накопление запаздываний
    m = m + 1 'количество запаздывающих работ
    If sngDur > maxV Then
      maxV = sngDur 'запоминание наибольшего запаздывания
    End If
    If sngDur < minV Then
      minV = sngDur 'запоминание наименьшего запаздывания
    End If
  Else
    minV = 0 'наименьшее возможное запаздывание
  End If
Next j
Cd(i) = Comp(VarNumber(i)) 'Момент окончания работы варианта'
Tc(i) = Round(Exec / Beta, 1) 'среднее запаздывание в календарных часах
Tmin(i) = Round(minV, 1) 'наименьшее запаздывание
Tmax(i) = Round(maxV, 1) 'наибольшее запаздывание
Kv(i) = Round(Exec / n / sngV, 2) 'коэффициент использования объема
Kg(i) = Round(BetaV / n, 2) 'коэффициент группирования
Kz(i) = Round(m / BetaV, 2) 'коэффициент запаздывания

```

Рис. 6.15 Определение основных параметров варианта

## 6.7 Перепланирование расписания

В п. 6.4 описывалась работа программы с некоторой начальной датой, или без изменения ранее заданной даты. В настоящем параграфе рассмотрим составление расписания при любом изменении начальной даты планирования. Такое изменение возможно как при появлении нового календарного задания, так и при необходимости выполнения срочной работы.

Рассмотрим действия пользователя на примере задания, первоначально имеющего вид, приведенный на листе 2 в книге MBook2.xls. Задание на 12.10.16 8:00 состоит из 25 работ четырех видов и составляется для круглосуточного трехсменного графика. Запуск программы приводит к восьми не доминируемым вариантам. Допустим, что целесообразно использовать вариант 1, показанный на рис. 6.16.

Поскольку продолжительность рабочего дня в данном случае составляет 24 часа, первый рабочий день заканчивается в 32 календарных часа. При этом в точном соответствии с расписанием, должны быть полностью выполнены работы 1, 4, 5, 6, 2, 9, 3,7 и начата работа 13. Во втором календарном дне работают только первая и вторая смены, и для них запланировано окончание работы 13 и выполнение работ 20, 8, 11, 16. По плану окончание второй смены должно произойти в 48 часов (т.е. 24 часа второго календарного дня). После выходного дня работа начинается с первой смены. После запуска машины в 82 часа (10 часов четвертого дня) 12 работ выполняются за последовательные 5 партий загрузки.

К концу первого календарного дня плановое подразделение цеха пересматривает результаты выполнения за день и составляет план следующего дня. Допустим, что в течение первого календарного дня работа 5 и работа 7 не были своевременно доставлены на машину, в результате чего первая партия загрузки проводилась с только работами 1,4, а загрузка партии с работами 3 и 7 была отменена. Было принято решение вместо этой партии выполнять следующую плановую партию загрузки, состоящую из работ 3, 13 вида 2, которая должна быть закончена в 31 час. Полагается, что работы 5 и 7 будут доставлены к началу первой смены следующего дня, т.е. к 8 часам утра. Кроме того, к моменту планирования появилась срочная работа с номером 26, для которой присвоим высокий весовой коэффициент, равный 5.

Очевидно, что к началу следующего рабочего дня необходимо провести перепланирование, в котором нужно учесть как появление новой работы, так и результаты прошедшего рабочего дня. Для перепланирования целесообразно полностью скопировать предыдущее задание на следующий лист MS Excel и откорректировать задание (рис. 6.17).

После подготовки в задании остаются только строки с невыполненными работами. Затем можно снова запустить программу, выбрать опции «без моделирования» и «без подготовки к перепланированию» и перейти к форме ввода, в которую необходимо ввести данные нового планирования. В данном случае начальный момент освобождения машины равен 31 час (7 часов нового дня), а начальная настройка соответствует виду 2 (после работ 3 и 13). Результат перепланирования показан на рис. 6.18.

Допустим, что в данном случае целесообразно выбрать вариант 2. Сравним расписание для рекомендуемого варианта 2 на рис. 6.18 с действующим расписанием, составленным ранее по

### План обработки по варианту 1

10 (1,4,5) 14; 14 (6) 18; 19 (2,9) 25; 25 (3,7) 31; 31 (13) 37; 37 (20) 43; 44 (8,11,16) 48;  
82 (10,15,17) 87; 88 (12,14,18,24) 94; 95 (19,22) 100; 102 (21,23) 106; 107 (25) 113;

Рис. 6.16 Расписание работ на листе 2

№работы	Вид k	Требуемый момент готовности час.	Ожидаемый момент поступления час.	Объем v	Вес w	Выполнение, %
1	1	4	0	30	1	100
2	2	6	2	50	2	100
3	2	8	5	40	1	100
4	1	4	3	30	1	100
5	1	9	8	60	2	0
6	1	12	5	30	1	100
7	2	12	9	50	1	0
8	1	22	7	30	1	0
9	2	24	18	40	1	100
10	3	27	10	30	1	0
11	1	30	10	50	1	0
12	4	34	12	20	1	0
13	2	37	14	50	1	100
14	4	40	16	30	1	0
15	3	45	20	40	1	0
16	1	47	18	30	1	0
17	3	50	20	40	1	0
18	4	40	19	20	1	0
19	3	59	20	40	1	0
20	2	62	20	50	1	0
21	1	70	56	40	1	0
22	3	77	35	50	1	0
23	1	88	58	40	1	0
24	4	92	27	50	1	0
25	2	93	25	60	1	0
26	3	24	0	40	5	0

**Рис. 6.17** Таблица задания после подготовки к перепланированию

состоянию на начало второго рабочего дня (рис. 6.19). Работа 13 была выполнена в первый день совместно с работой 3.

Из рис. 6.19 следует, что появление срочной работы, а также отсрочка некоторых работ, приводит к нескольким изменениям в ранее составленном плане, но в целом разработанный метод расчета расписания обеспечивает его устойчивость к внешним воздействиям. В данном случае, для работы 26 используется весовой коэффициент 5, и партия загрузки с работой 26 и двумя другими работами этого же вида оказывается на первом месте в расписании, после чего программа предусматривает несколько перестановок в группах работ. Использование для срочной работы 26 весового коэффициента, например равного 3, приводит к появлению вариантов с более поздним выполнением этой работы (рис. 6.20).

Недоминируемые варианты										
Вариант 1:	10,15,26	5,8	11,16	17,19	12,14,18,24	7,20	25	21,23	22	
Вариант 2:	10,15,26	5,8	11,16	17,19	21,23	22	12,14,18,24	7,20	25	
Вариант 3:	10,15,26	5,8	11,16	21	23	17,19	22	7,20	25	12,14,18,24

Рис. 6.18 Не доминируемые варианты плана для задания работ

Новое расписание на 13.10										
Вариант 2:	10,15,26	5,8	11,16	17,19	21,23	22	12,14,18,24	7,20	25	
Остаток расписания на 12.10										
Вариант 5:	13	20	8,11,16	12,14,18	24	21,23	10,15,17	19,22	25	

Рис. 6.19 Действующее расписание и его корректировка

Недоминируемые варианты										
Вариант 1:	5,8	10,15,26	11,16	17,19	12,14,18,24	7,20	25	21,23	22	
Вариант 2:	5,8	10,15,26	11,16	17,19	21,23	22	12,14,18,24	7,20	25	
Вариант 3:	5,8	10,15,26	11,16	21	23	17,19	22	7,20	25	12,14,18,24

Рис. 6.20 Варианты плана с уменьшенным весовым коэффициентом для работы 26

## 6.8 Моделирование расписания

Моделирование проводится по методике, аналогичной изложенной выше в п. 5.8. На листе 4 приведены результаты моделирования для настоящего примера. Расчет расписания во всех случаях производится очень быстро. Моделирование показывает, что в данном случае параметр  $B1$  количества работ имеет оптимальное значение, равное 16, параметр  $B2$  – значение 3 и параметр  $B3$  – значение 0,02. Для психологического коэффициента имеет смысл установить значение 0,1.

Качество расписания весьма существенно зависит от величины горизонта планирования, поскольку с увеличением горизонта планирования в расписание включаются дополнительные работы.

На листе 5 MS Excel приведено задание из 30 работ, причем наибольший срок выполнения, равный 105 календарных часов, имеет работа 29. Перед моделированием следует убедиться, что все необходимые данные правильно вносятся с листа в массивы программы. Для этого целесообразно запустить программу в режиме «без моделирования», а затем удалить результаты расчета.

При работе в режиме «моделирование» для изучения влияния планового горизонта его величина последовательно изменяется при постоянных остальных параметрах моделирования. На листе 5 приведены результаты таких расчетов при увеличении планового горизонта от 20 до 110 календарных часов. Величина планового горизонта устанавливается по заданному сроку выполнения работ, при этом количество учитываемых работ соответственно изменяется. На рис. 6.21 приведены результаты расчета расписаний в этом диапазоне, причем для каждого





**Рис. 6.23** Параметры расписаний для разных горизонтов: 1 – приведенные затраты переналадок за один рабочий день, умноженные на 10; 2 – полезность выполняемого набора работ; 3 – коэффициент группирования; 4 – коэффициент использования объема

ся относительно этого значения. Коэффициент группирования на кривой 3 также постепенно повышается до величины 2,2, а затем колеблется относительно значения, примерно равного 2.

Быстрое уменьшение полезности работ при горизонте до 50 часов связано тем, что третий плановый день является выходным. В последующие рабочие дни полезность несколько повышается, и в дальнейшем полезность работ испытывает колебания, но в целом постепенно падает.

Коэффициент использования объема (кривая 4) с ростом горизонта планирования постепенно растет и стабилизируется около значения, равного 0,9.

Проведенный анализ свидетельствует о том, что в данном случае увеличение горизонта эффективно, поскольку оно приводит к увеличению коэффициента использования объема. Однако при увеличении горизонта более 50 полезность заказов с ростом горизонта планирования резко падает, и поэтому горизонт в 50 календарных часов становится в данном случае критическим значением при составлении расписания.

Необходимо отметить, что вследствие высокого коэффициента группирования – около двух, плановая партия загрузки, в данном случае содержит, как правило, не менее двух работ. Поэтому отклонения от прибытия каждой работы в плановой партии загрузки сказываются на ее возможном моменте начала. По этой причине очевидно, что с ростом горизонта планирования вероятность точного выполнения запланированного расписания быстро падает.

## Построение расписания для обрабатывающего центра

7.1 Введение .....	123	7.5 Блок-схема программы .....	129
7.2 Исходные данные для группового выполнения работ на одиночном обрабатывающем центре .....	124	7.6 Листинг основной части программы.....	129
7.3 Работа с программой .....	126	7.7 Перепланирование расписания .....	138
7.4 Анализ результатов планирования .....	128	7.8 Моделирование расписания .....	142

### 7.1 Введение

Обрабатывающий центр – это одностадийная многофункциональная обрабатывающая система с числовым программным управлением, предназначенная для выполнения различных операций над заготовкой с помощью автоматической смены инструмента. Магазин имеет ограниченную вместимость, каждая выполняемая работа нуждается в соответствующем приспособлении.

Обрабатывающие центры применяются, в основном, для изготовления сложных деталей, выпускаемых небольшими партиями. Для любой такой детали могут использоваться как все возможные операции машины, так и некоторая часть возможных операций. При этом, как правило, для деталей каждого вида необходим свой набор инструментов. При составлении расписаний каждая поступающая на обрабатывающий центр партия деталей обычно рассматривается как отдельный заказ с директивно установленным моментом изготовления; выполнение всех операций заказа называется работой.

Частая смена приспособлений и инструментов ведет к значительным затратам, которые могут быть уменьшены путем некоторого группирования работ в расписании. При использовании обрабатывающего центра в одной группе оказываются партии работ, для которых необходимы одинаковые (или близкие) приспособления. Обычно в исследованиях по групповым расписаниям на одиночной машине рассматриваются задачи с заданными значениями длительности работы, требуемого времени выполнения, времени переналадки и времени обслуживания. В то же время эффективность составляемого расписания работ для обрабатывающего центра существенно зависит от частоты смены инструментов.

Эта частота, в свою очередь, определяется видом (твердостью) изготавливаемых деталей. Если материал детали – сталь, то стойкость режущего инструмента находится в пределах десятков минут операционного времени, что часто обеспечивает обработку только некоторой части всей работы. Поэтому за время выполнения одной работы в расписании замена инструментов произ-

водится несколько раз и, соответственно, полное количество замен инструмента мало зависит от порядка выполнения работ.

Если деталь изготавливается из материала с твердостью, существенно меньшей, чем сталь, стойкость режущего инструмента часто обеспечивает изготовление нескольких партий разных деталей без замены этого инструмента. Например, при обработке алюминиевых сплавов стойкость режущего инструмента обычно находится в пределах 1,5 – 3 часа операционного времени (Грубый и Зайцев, 2015), что часто вполне достаточно для обрабатывающего центра в течение нескольких рабочих смен. В этом случае главным отличием групповой обработки оказывается зависимость наполнения инструментального магазина от последовательности обработки деталей разных видов. В настоящей книге рассматривается именно этот случай.

Часть набора инструментов, требующегося для текущей партии, к моменту ее обработки может находиться в магазине машины; недостающие инструменты должны быть установлены заново. При этом возникает вопрос: взамен каких неиспользуемых для данной работы инструментов должны быть установлены недостающие? Естественным ответом является стремление сохранить в составе магазина инструменты, которые применяются часто, и заменять редко используемые инструменты.

При составлении расписания необходимо руководствоваться некоторыми критериями оптимизации. Здесь, как и в предыдущих главах, предлагается динамический метод группового планирования, позволяющий предложить пользователю набор из нескольких вариантов решений для окончательного выбора. При этом для оценки качества планирования используются два критерия: критерий средней полезности заказов и критерий относительных издержек на переналадку на горизонте планирования. Издержки на переналадку возникают как при замене приспособления, так и при замене инструментов в гнездах магазина.

Согласно структурной формуле теории расписаний, поставленная задача для одиночной машины может быть записана как

$$1|r_i, d_i, s_k, Z_{k,k-1}|U, \bar{V}. \quad (7.1)$$

Формула 7.1 отличается от формулы 5.1 наличием величины  $Z_{k,k-1}$ , которая равна количеству инструментов, заново устанавливаемых в магазин для  $k$ -ой работы после работы  $k - 1$ . В данном случае длительность переналадок  $s_k$  с одного вида приспособления на другой не зависит от их порядка. Остальные параметры выражения 7.1 совпадают с параметрами в формуле 5.1.

Так же, как в главе 5, программа представляет собой макрос на языке VBA для электронной книги MS Excel. Рабочее задание записывается на листе MS Excel; после выполнения программы результат записывается этом же листе и на формах книги.

## 7.2 Исходные данные для группового выполнения работ на одиночном обрабатывающем центре

Исходные данные для составления расписания настоящей задачи записываются на листе MS Excel электронной книги MBook3.xls. Эта книга в состоянии поставки состоит из четырех листов, на которых иллюстрируются различные аспекты составления расписаний.

На листе 1 в табл. \$A\$5:\$G\$19 находится задание, состоящее из пятнадцати работ, использующих приспособления четырех различных видов. В каждой строке задания описываются параметры работ:

- номер работы;

- требуемый момент готовности в календарных часах;
- ожидаемый момент поступления заготовки в календарных часах;
- количество штук в партии;
- весовой коэффициент работы;
- тип приспособления и выполнение работы в процентах.

Моменты готовности и поступления работ, как обычно, отсчитываются от момента наступления календарного дня, являющегося первым в расписании. Целесообразно записывать работы в порядке возрастания требуемых дат их выполнения.

Во второй строке листа записываются значения параметров процесса планирования, причем, в основном, используются те же параметры, что и в программе MBook1.xls. Дополнительными являются параметры «Трудоёмкость установки одного инструмента», «Трудоёмкость обращения к складу», «Продолжительность восстановления инструмента» и «Длительность перемещения магазина на операцию», которые записаны в ячейках \$N\$2, \$T\$2, \$V\$2 и \$X\$2 соответственно.

Перечень выполняемых операций для каждой работы приведен в табл. \$I\$5:\$L\$93, фрагмент которой приведен на рис. 7.2. В последнем столбце таблицы приводится расчетный процент израсходования используемого инструмента на выполнение текущей операции.

Для каждого инвентарного номера инструмента ведется журнал учета процента его текущего износа (табл. \$O\$5:\$Q\$34). Полное количество имеющихся типов инструмента записывается в ячейке \$AB\$2. Состав текущего набора в магазине машины на момент планирования приведен в таблице \$\$\$5:\$T\$19.

В табл. \$X\$5:\$Z\$8 приведены нормы времени в минутах на замену оснастки (приспособления) машины и на замену каждой обрабатываемой детали. В табл. \$V\$31:\$AI\$34 описан календарный график работы машины по дням, начинающийся с первого дня выполнения со-

№ работы	Требуем	Ожидаем	Количест	Тип	Выполне	
	ый	ый				
и час.	момент	момент	во, шт.	Весовой	ние, %	
	готовност	поступле		коэффици		
		ния час.		ент		
				оснастки		
1	-1	-4	15	3	1	0
2	5	0	10	1	4	0
3	8	1	15	1	2	0
4	14	0	20	1	1	0
5	18	0	10	1	3	0
6	28	3	15	1	1	0
7	35	2	10	1	2	0
8	42	0	20	1	1	0
9	53	8	10	1	4	0
10	60	7	10	1	2	0
11	74	7	15	1	1	0
12	85	5	20	1	3	0
13	96	9	20	1	1	0
14	106	10	10	1	2	0
15	112	10	15	1	1	0

Рис. 7.1 Таблица исходных заказов на листе 1

№	Номер	Длительно	Процент
работы	типа	сть	израсход
	инструме	обработки	ования в
	нта	одной	час
		шт., мин.	
1	3	2	30
1	7	4	35
1	10	2	32
1	14	3	45
1	12	2	40
1	19	2	30
2	5	4	34
2	1	2	46
2	11	2	57
2	15	3	53

Рис. 7.2 Фрагмент таблицы операций

ставляемого расписания. Для каждой смены календарного дня проставлено количество рабочих часов.

В первой строке записываются параметры обработки данных и записи результатов планирования. Данные в таблицах можно изменять до начала планирования путем непосредственного ввода их значений в ячейки листа электронной таблицы. Значениями параметров следует управлять в процессе планирования с помощью форм.

Работа программы, как и в предыдущих главах, основана на методе планирования по критериям издержек  $U$  и средней полезности выполнения заказов  $\bar{V}$ , изложенных в п. 3.4.2 и п. 3.4.1. Результаты планирования записываются на рабочем листе электронной книги в виде нескольких возможных вариантов.

На листе 2 приведен возможный вариант перепланирования задания на листе 1. На листе 3 приведен пример моделирования задания на листе 1, на листе 4 приведен случай составления расписания при круглосуточной работе машины.

### 7.3 Работа с программой

Для работы с программой планирования в MS Excel устанавливается соответствующий рабочий лист, например, лист 1 и осуществляется команда Макросы/Utility1/Выполнить. При нажатии кнопки «Запуск программа» программа начинает работать. Система сообщает о последней дате планирования и предлагает одну из двух возможностей – подготовку планирования с новой датой или повторение расчета с последней датой. В случае расчета расписания без перехода на новую дату, при котором открывается форма «Ввод данных» (рис. 7.3).

Результат планирования зависит от типа оснастки, на который машина настроена в начальный момент выполнения задания. Работа с формой на рис. 7.3 аналогична работе, описанной выше в п. 5.3. Затем система автоматически рассчитывает загрузку машины и выдает соответствующее сообщение.

Ввод данных

Позиционный коэффициент 0,1	Длительность планового периода в днях 3	Количество рабочих дней 3	Стоимость часа времени наладки 3	Стоимость рабочей смены 8	
Трудоемкость установки одного инструмента, мин. 4	Длительность обращения к складу, мин. 20	Длительность переноса на операцию, мин. 1	Продолжительность восстановления инструмента, час 10	Количество типов инструмента 20	
Имя первой ячейки списка работ A5	Имя последней ячейки списка работ G19	Имя первой ячейки списка операций I5	Имя последней ячейки списка операций L93	Имя первой ячейки рабочего календаря V31	Имя последней ячейки рабочего календаря AI34
Имя первой ячейки типов операций X5	Имя последней ячейки типов операций Z8	Имя первой ячейки имеющегося набора инструментов O5	Имя последней ячейки имеющегося набора инструментов Q34	Имя первой ячейки текущего набора в магазине S5	Имя последней ячейки текущего набора в магазине T19
Тип операции на момент планирования 3	Начало рабочего дня, часы 8	Момент освобождения в календарных часах 10	Момент планирования 16.09.2016	Имя ячейки результата расчета J100	
Текущие параметры OK	Ввод данных в Excel OK	Запуск программы OK	Выход из программы OK		

Рис. 7.3 Форма ввода параметров задачи

**Недоминируемые варианты**

Вариант 1:	1	2	3	7	4	9	5	13	15	11	6	10	8	12	14
Вариант 2:	1	2	3	7	4	9	5	13	15	11	6	10	14	8	12
Вариант 3:	5	2	1	6	4	9	3	7	14	15	11	8	10	12	13
Вариант 4:	5	2	1	6	4	9	3	7	14	15	11	8	12	10	13
Вариант 5:	5	2	1	6	4	9	3	7	14	15	10	12	11	8	13
Вариант 6:	5	2	9	1	4	3	10	7	14	15	6	8	11	12	13
Вариант 7:	5	2	9	1	4	3	10	7	14	15	6	11	8	12	13
Вариант 8:	5	2	9	1	11	7	10	14	13	15	4	6	8	3	12
Вариант 9:	5	2	9	1	11	7	10	14	13	15	6	8	4	3	12
Вариант 10:	5	2	9	1	11	7	10	14	3	12	4	6	8	13	15

Рис. 7.4 Результаты работы программы на листе 1

По окончании расчета все возможные и не доминируемые варианты выводятся на экран (рис. 7.4). В каждом варианте последовательно перечисляются номера выполняемых работ. Время работы данного примера составляет несколько секунд. Дальнейшая работа пользователя заключается в выборе из предлагаемого набора одного варианта, наиболее рационального с точки зрения пользователя. Для определения рекомендуемых решений в программе, как и выше, используются методы принятия решений Сэвиджа и Гурвица. Для всех не доминируемых вариантов выводятся данные о значениях критериев  $U$ ,  $V$  (рис. 7.5), а также значения коэффициентов группирования  $K_g$  и запаздывания  $K_z$ , полной длительности выполнения расписания

Коэффициент плановой загрузки: 1,2  
 Рекомендуемые варианты: по методу Свиджа - вариант 6, по методу Гурвица - вариант 7  
 Показатели вариантов расписания:

относительные затраты на наладку набора работ  $U$ ; средняя полезность заказов  $V$ ; коэффициент группирования  $K_g$ ; коэффициент запаздывания  $K_z$ ; полная длительность выполнения  $Stax$ ; среднее  $Tc$  и наибольшее  $Tmax$  запаздывания в календарных часах

Вариант 1:	$U = 5,16$ ;	$V = -0,041$ ;	$K_g = 1,36$ ;	$K_z = 1$ ;	$Stax = 165$ ;	$Tc = 44$ ;	$Tmax = 102,6$
Вариант 2:	$U = 4,965$ ;	$V = -0,169$ ;	$K_g = 1,5$ ;	$K_z = 1$ ;	$Stax = 164$ ;	$Tc = 43,5$ ;	$Tmax = 113,8$
Вариант 3:	$U = 4,526$ ;	$V = -0,25$ ;	$K_g = 1,88$ ;	$K_z = 0,93$ ;	$Stax = 164$ ;	$Tc = 40,2$ ;	$Tmax = 91$
Вариант 4:	$U = 4,525$ ;	$V = -0,264$ ;	$K_g = 1,88$ ;	$K_z = 0,93$ ;	$Stax = 164$ ;	$Tc = 40,4$ ;	$Tmax = 94,8$
Вариант 5:	$U = 4,477$ ;	$V = -0,336$ ;	$K_g = 1,88$ ;	$K_z = 0,93$ ;	$Stax = 164$ ;	$Tc = 40,5$ ;	$Tmax = 113$
Вариант 6:	$U = 4,328$ ;	$V = -0,693$ ;	$K_g = 2,5$ ;	$K_z = 0,87$ ;	$Stax = 163$ ;	$Tc = 41,9$ ;	$Tmax = 91,7$
Вариант 7:	$U = 4,278$ ;	$V = -0,717$ ;	$K_g = 2,5$ ;	$K_z = 0,87$ ;	$Stax = 163$ ;	$Tc = 41,6$ ;	$Tmax = 95,7$
Вариант 8:	$U = 4,221$ ;	$V = -1,428$ ;	$K_g = 2,5$ ;	$K_z = 0,73$ ;	$Stax = 163$ ;	$Tc = 42,1$ ;	$Tmax = 146,9$
Вариант 9:	$U = 4,172$ ;	$V = -1,508$ ;	$K_g = 2,5$ ;	$K_z = 0,73$ ;	$Stax = 163$ ;	$Tc = 42$ ;	$Tmax = 146,9$
Вариант 10:	$U = 4,096$ ;	$V = -2,245$ ;	$K_g = 3$ ;	$K_z = 0,73$ ;	$Stax = 163$ ;	$Tc = 41,3$ ;	$Tmax = 104,7$

Рис. 7.5 Значения показателей расписания для различных вариантов

$Stax$ , среднего  $Tc$  и наибольшего  $Tmax$  запаздываний. Величина коэффициента группирования определяется формулой 2.1, коэффициента запаздывания – формулой 2.3. Для упрощения вывода символов на лист MS Excel, символ  $\bar{V}$  на рис. 7.5 заменен символом  $V$ .

В данном примере машина перегружена, и подавляющая часть заказов выполняется с опозданием. Положим, что пользователь выбирает в качестве окончательного расписания вариант 2, обеспечивающий малое значение для наибольшего запаздывания  $Tmax$  и имеющий наибольший коэффициент группирования при таком запаздывании.

## 7.4 Анализ результатов планирования

Для расчета плана по анализируемому варианту система, как и выше, предлагает форму «Расчет плана». При расчете плана, приведенного на рис. 7.6, учитываются моменты поступления работ, их продолжительность, нормы времени на переналадку и рабочий календарь.

В плане на рис. 7.6 последовательно перечисляются все запланированные работы с указанием их моментов начала и окончания в календарных часах. Для каждой работы указывается необходимая оснастка, перечисляются все вновь используемые инструменты, а также гнезда магазина, в которые эти инструменты должны быть установлены. Кроме того, указывается инвентарные номера инструментов, для которых необходимо восстановление (переточка).

В данном примере, некоторые работы сгруппированы таким образом, чтобы для них не было необходимости в смене оснастки – например, работы 3 и 7; работы 13, 15, 11, 6; работы 10 и 14. Последовательность выполнения работ не обязательно связана с заданным сроком выполнения, хотя, конечно, этот срок существенно учитывается. На эту последовательность влияет также длительность операционного времени и необходимость в изменении набора инструментов в магазине. В данном случае совокупность этих факторов приводит, например, к целесообразности выполнения работы 7 раньше, чем работы 4.

При круглосуточной работе машины (лист 4) последовательность выполнения работ примерно сохраняется та же, что и при двухсменной работе. В то же время полная длительность выполнения  $Stax$  падает с 165 до 138 часов.

## Расписание работ, оснастка и инструменты по варианту 2

Работа 1: начало 10,3, окончание 16 час., оснастка 1, используемые инструменты: 5, установить инструменты в гнезда: 11 в 2, 14 в 7, 18 в 10, 16 в 14, 25 в 12  
 Требуют восстановления инструменты: 10  
 Работа 2: начало 16,2, окончание 19 час., оснастка 4, используемые инструменты: 8, 1, установить инструменты в гнезда: 15 в 9, 20 в 12  
 Требуют восстановления инструменты:  
 Работа 3: начало 19,3, окончание 33,2 час., оснастка 2, используемые инструменты: 3, 1, 8, 17, установить инструменты в гнезда: 6 в 2, 24 в 5  
 Требуют восстановления инструменты: 7  
 Работа 7: начало 33,2, окончание 37,4 час., оснастка 2, используемые инструменты: 3, 5, 15, 14, установить инструменты в гнезда: 30 в 5, 22 в 2  
 Требуют восстановления инструменты: 8  
 Работа 4: начало 37,8, окончание 44,8 час., оснастка 1, используемые инструменты: 21, 5, 12, установить инструменты в гнезда: 14 в 15, 6 в 2  
 Требуют восстановления инструменты: 14  
 Работа 9: начало 45, окончание 84,3 час., оснастка 4, используемые инструменты: 21, 17, 1, 14, 18, установить инструменты в гнезда: 12 в 7, 25 в 2  
 Требуют восстановления инструменты:  
 Работа 5: начало 84,5, окончание 89,3 час., оснастка 3, используемые инструменты: 20, 2, 21, 14, 3, 15, установить инструменты в гнезда: 10 в 2, 26 в 12  
 Требуют восстановления инструменты: 1, 15  
 Работа 13: начало 89,9, окончание 106,6 час., оснастка 1, используемые инструменты: 4, 12, 18, 5, 21, установить инструменты в гнезда: 15 в 3  
 Требуют восстановления инструменты: 3, 18, 5, 21  
 Работа 15: начало 106,6, окончание 113,1 час., оснастка 1, используемые инструменты: 4, 16, 10, установить инструменты в гнезда: 18 в 1, 6 в 6, 24 в 9  
 Требуют восстановления инструменты: 10  
 Работа 11: начало 113,1, окончание 117,1 час., оснастка 1, используемые инструменты: 2, установить инструменты в гнезда: 20 в 2, 9 в 10, 5 в 11  
 Требуют восстановления инструменты:  
 Работа 6: начало 117,1, окончание 130,6 час., оснастка 1, используемые инструменты: 30, 12, 5, 6, 18, установить инструменты в гнезда: 28 в 12  
 Требуют восстановления инструменты: 2  
 Работа 10: начало 130,9, окончание 135,8 час., оснастка 2, используемые инструменты: 12, 16, 15, 9, установить инструменты в гнезда: 3 в 8, 8 в 9, 19 в 10  
 Требуют восстановления инструменты: 4, 30, 18  
 Работа 14: начало 136, окончание 140,1 час., оснастка 2, используемые инструменты: 20, 3, 17, установить инструменты в гнезда: 27 в 1, 9 в 4, 22 в 5  
 Требуют восстановления инструменты: 3, 17  
 Работа 8: начало 140,5, окончание 158,8 час., оснастка 1, используемые инструменты: 28, 18, установить инструменты в гнезда: 25 в 8, 10 в 13, 21 в 1, 3 в 5  
 Требуют восстановления инструменты: 16  
 Работа 12: начало 158, окончание 164,3 час., оснастка 3, используемые инструменты: 3, 8, 28, установить инструменты в гнезда: 18 в 14, 17 в 4, 24 в 8  
 Требуют восстановления инструменты: 19

Рис. 7.6 План обработки

## 7.5 Блок-схема программы

Блок-схема программы состоит из тех же четырех основных частей, что блок-схема на рис. 5.12. В то же время, при определении недоминируемых узлов как первого, так и последующих уровней, программа включает механизмы рациональной комплектации магазина. На каждом уровне, как обычно, все возможные узлы сравниваются по критериям  $U$ ,  $\bar{V}$ .

Для каждого узла дерева состав магазина получается различным, и запоминание состава для всех отобранных узлов становится затруднительным. Поэтому на каждом уровне построения дерева программа оперирует с наборами инструментов в магазине, соответствующими наборам только предыдущего уровня.

После выбора одного из полученных вариантов плана, система на каждом уровне построения дерева пересчитывает состав магазина в соответствии с последовательностью выполняемых работ. Полученный план выводится на лист в качестве окончательного расписания. В нижней части плана подсчитывается общее количество вновь устанавливаемых инструментов, необходимых для выполнения операций.

## 7.6 Листинг основной части программы

На рисунках ниже приведены отдельные компоненты листинга программы. На рис. 7.7 описаны данные о переменных и массивах, действующих по всей программе. На каждом уровне построения дерева 5 массивов  $UStage()$ ,  $VStage()$ ,  $ParStage()$ ,  $CompStage()$ ,  $NPStage()$  имеют назначение, совпадающее с назначением аналогичных массивов в главе 5. Кроме этих пяти основных массивов, в описываемой программе необходим массив  $Tk()$  моментов начала обработки в узле и массив  $NodeStage()$  для запоминания номера узла предыдущего уровня,

из которого ведется ветвление для создания текущего узла. Семь массивов  $U()$ ,  $V()$ ,  $Par()$ ,  $Commen()$ ,  $Comp()$ ,  $NP()$ ,  $Node()$  используются для дальнейшего построения ветвей дерева путем перезаписи значений параметров недоминируемых узлов, остающихся после отсеечения.

Необходимые параметры для каждой работы, планируемой на текущем уровне, записываются в три массива: массив инвентарных номеров необходимых инструментов  $MagJob()$ , массив процентов износа таких инструментов  $IznosJob()$  и массив  $UnfitJob()$  инструментов, требующих восстановления в связи с выполнением данной работы. После выполнения работы, запланированной на текущем уровне, в массивах  $MagStage()$  и  $IznosStage()$  записываются данные об инвентарных номерах инструментов в магазине на уровне и износе всех имеющихся инструментов. Для каждой работы рассчитываются и записываются в массивах  $NOper()$  и  $POper()$  количество операций и суммарная трудоемкость по необходимым операциям, в массиве  $insD$  записывается перечень типов инструмента, необходимых для выполнения текущей операции.

```

Dim des() As Integer ..... 'массив номеров (обозначений) работ в списке работ'
Dim d() As Integer 'массив требуемых моментов окончания в календарных часах'
Dim dd() As Single 'массив требуемых моментов окончания в часах работы'
Dim ds() As Single 'массив требуемых дат начала'
Dim R() As Single 'массив поступления работ в календарных часах'
Dim Kol() As Integer 'массив количества штук в работе'
Dim W() As Single 'массив весов работ'
Dim Ek() As Integer 'массив эмиссии в процентах'
Dim Vid() As Integer 'массив типов оснатики для каждой работы'
Dim deaD() As Integer 'массив обозначений работ в списке операций'
Dim insD() As Integer 'массив типов инструментов в списке операций'
Dim p() As Single 'массив продолжительности работы инструмента в мин.'
Dim Iznos() As Single 'массив скорости распадавания инструмента на операции'
Dim NOper() As Integer 'массив количества операций в каждой работе'
Dim POper() As Single 'массив трудоемкости каждой работы'
Dim Inv() As Integer 'массив инвентарных номеров инструмента'
Dim insV() As Integer, insZ() As Integer 'массив типа инструмента в инвентарном списке, массив процента износа инструмента'
Dim insP() As Integer 'массив инвентарных номеров в текущем наборе магазина'
Dim KolTyp() As Integer 'массив количества требуемых типов инструмента в наборе заказов'
Dim Freq() As Integer 'массив потребности в конкретных инструментах магазина для набора заказов'
Dim deaD() As Integer, setD() As Single 'массив обозначений оснатики, массив норм времени на смену детали в мин.'
Dim s() As Integer 'массив норм времени на установку оснатики в мин.'
Dim G As Single, a As Single 'длительность планового периода, психологический коэфф.'
Dim C As Single, CH As Single 'стоимость смены, длительность смены, стоимость часа наладки'
Dim K0 As Single, Vid0 As Integer 'момент освобождения машин, дата работ в начальный момент'
Dim Tc As Single, Ta As Single, Tt As Single, Tz As Single, Tv As Single
'длительность установки, смена помпик, обращение в склад, переменажи на операции, восстановления
Dim Z() As Single 'массив длительности рабочего дня
Dim Tn As Single, Delta As Integer 'момент начала рабочего дня в часах, количество дней в календаре
Dim Vins As Integer, Cl As Single 'количество мест в магазине, момент окончания работы машин
Dim Tk() As Single 'массив моментов начала работы в узле'
Dim nJ() As Single 'массив неток выполнения работ'
Dim U() As Single, V() As Single 'массивами функций затрат и функций полезности заказов, недоминируемые узлы всех уровней'
Dim Par() As Integer 'массив номеров родительских узлов для недоминируемых узлов всех уровней'
Dim Commen() As Single 'массив начала работ для недоминируемых узлов всех уровней'
Dim Comp() As Single 'массив моментов окончания работ для недоминируемых узлов всех уровней'
Dim Number() As Long 'массив номеров, предшествующих первым узлам в уровнях'
Dim NP() As Integer 'массив номеров работ в узлах для недоминируемых узлов всех уровней'
Dim Node() As Integer 'массив номеров узлов каждого уровня в дереве'
Dim VStage() As Single, VStage() As Single 'массивами функций затрат и функций полезности заказов на текущем уровне'
Dim ParStage() As Integer 'массив номеров родительских узлов на текущем уровне'
Dim CompStage() As Integer 'массив моментов окончания работ на текущем уровне'
Dim NPStage() As Integer 'массив номеров работ в узлах на текущем уровне'
Dim NodeStage() As Integer 'массив номеров узлов одного уровня'
Dim MagJob() As Integer 'массив инв. номеров инструментов для текущей работы на уровне'
Dim IznosJob() As Integer 'массив процентов износа инструментов для текущей работы на уровне'
Dim UnfitJob() As Integer 'массив инструментов, требующих восстановления для текущей работы на уровне'
Dim MagStage() As Integer 'массив инв. номеров инструментов в магазине на уровне'
Dim IznosStage() As Integer 'массив процентов износа инструментов в магазине на уровне'
Dim IntV As Integer, IntZ As Integer 'номера ступеней дерева расчета и узлов на каждой ступени'

```

Рис. 7.7 Глобальные переменные программы

В массиве *KolTyp()* по каждому типу инструмента запоминается требуемое количество применений на операциях для всего набора работ. Эти данные затем используются на каждом уровне построения дерева для формирования массива *Freq()* потребности в конкретных инструментах, устанавливаемых в магазин для выполнения текущей работы. Ниже глобальных переменных в программе описывается ряд вспомогательных локальных переменных и затем вызывается форма ввода параметров (рис. 7.3).

После записи исходных данных в рабочие массивы программы проводится расчет количества применений инструментов каждого типа на каждой операции каждого заказа (рис. 7.8). Для каждой операции в исходной табл. 7.1 с помощью функции *DetermO* устанавливается строка таблицы заказов, номер операции в заказе и запоминается необходимый тип инструмента в соответствующем двумерном массиве *insD()*. После каждого упоминания типа инструмента, частота упоминаний запоминается в массиве *KolTyp()*.

Расчет загрузки машины, аналогично расчету в главе 6, производится путем накопления продолжительность машинной обработки всего набора работ *Wip* (рис. 7.9). Полный фонд времени *Fond* по всем работам на горизонте планирования устанавливается по строке с наибольшим резервом времени в рабочих часах. Коэффициент загрузки *KWip* определяется как частное от деления полной трудоемкости на фонд времени.

В начале планирования производится анализ набора инструментов, уже находящегося в магазине. Для этого определяется частота использования инструментов, уже находящихся в

```

For i = 1 To BetaD 'по операциям
  x = DetermO(Beta, desD(i)) ' Номер строки в таблице заказов
  If desD(i) <> Job Then 'для новой работы
    n = 1 'номер операции
  Else 'для уже текущей работы
    n = n + 1 'номер операции
  End If
  insD(x, n) = Cells(Alfa + i - 1, Gamma + 1).Value 'номер типа инструмента '
  p(x, n) = Cells(Alfa + i - 1, Gamma + 2).Value 'длительность работы инструмента
  Iznos(x, n) = Cells(Alfa + i - 1, Gamma + 3).Value 'процент износа на операции '
  KolTyp(insD(x, n)) = KolTyp(insD(x, n)) + 1 'требуемое количество применений по каждому типу
  'инструмента для всего набора работ
  Job = desD(i) 'запоминание текущего номера работы
Next i

```

Рис. 7.8 Расчет количества применений инструментов

```

Wip = 0
For i = 1 To Beta
  POper(i) = POper(i) + setD(TypO(i)) 'учет времени установки детали в приспособление в мин.
  qs(i) = d(i) - POper(i) / 60 * Kol(i) 'необходимый момент запуска работы в рабочих часах
  Wip = Wip + POper(i) / 60 * Kol(i) 'накапливание загрузки в часах
Next i
If Fond > 0 Then 'предохранитель нулевого фонда
  KWip = Round(Wip / Fond, 1) 'коэффициент загрузки
  Resp = MsgBox("Коэффициент загрузки машины равен " & KWip & ". Продолжить расчет?", vbYesNo)
  If Resp = vbNo Then
    Exit Sub
  End If
Else
  KWip = 1
End If

```

Рис. 7.9 Расчет коэффициент загрузки

гнездах магазина (рис. 7.10). Номера гнезд, отсортированные по частоте установленных в них инструментов, записываются в массиве *VarMag()*.

По окончании предварительного анализа магазина проводится цикл расчета основных параметров узлов первого уровня по всему количеству заказов *Beta*. Для каждого вновь создаваемого узла, прежде всего, проверяется возможность использования инструментов, уже находящихся в магазине (рис. 7.11). Если инструмент необходимого типа уже имеется в магазине и степень его износа до конца выполнения работы меньше 100%, то такой инструмент записывается в двумерный массив *MagJob()* для текущей работы. Одновременно степень износа инструмента запоминается в массиве *IznosJob()*.

После проверки инструментов в магазине, проводится цикл подбора всех необходимых инструментов для выполнения работы в создаваемом узле дерева. Если такой инструмент уже находится в магазине, то он записан в массиве *MagJob()*, и в дальнейшем поиске нет необ-

```

For i = 1 To VIna      'по всем гнездам магазина '
insP(i) = Cells(Alfa + i - 1, Gamma + 1).Value 'массив инвентарных номеров установленных инструментов
If insP(i) = 0 Then
Freq(i) = 0
Else
Shift = Determ(BetaM, insP(i)) 'индекс в списке инструментов
Freq(i) = KolTyp(insV(Shift)) 'частота использования инструмента
End If
Next i

```

Рис. 7.10 Частота использования инструмента в магазине до начала планирования

```

n = 0 'номер узла
For i = 1 To Beta      'расчет полезности заказов на первом уровне'
f = 0 'порядковый номер инструмента в массиве работы
m = 0 'номер удаляемого инструмента
FlagP = 0 ' флаг задержки за счет перегочки инструмента в магазине
aJ(i) = 0.5          'готовится узел первого уровня с 1-ой выполняемой работой '
n = n + 1           'новый узел
For j = 1 To MOpex(i) 'цикл по инструментам всех типов, нужных для текущей работы
FlagJ = 0 ' флаг нахождения нужного инструмента
Typ = insV(i, j)   'нужный тип инструмента для работы
For k = 1 To VIna 'поиск инструмента нужного типа в магазине
If insP(k) > 0 Then 'если в ячейке магазина есть инструмент
Shift = Determ(BetaM, insP(k)) 'порядковый номер инт. номера инструмента в списке наличия инструментов
If Typ = insV(Shift) Then 'если инструмент нужного типа в магазине есть
Elec = Kol(i) * p(i, j) / 60 * Iznos(i, j) ' процент износа инструмента за время выполнения работы
If insZ(Shift) + Elec <= 100 Then ' проверка возможности полного выполнения работы
f = f + 1 'порядковый номер в массиве инвентарных номеров инструмента
MagJob(n, f) = insP(k) 'запись инвентарного номера инструмента в массив для текущей работы
IznosJob(n, f) = insZ(Shift) + Elec 'заполнение текущего износа
FlagJ = 1 ' нужный инструмент есть в магазине
k = VIna 'прекращение поиска в магазине
Else ' если инструмент не обеспечивает выполнение работы
m = m + 1 'порядковый номер удаляемого инструмента
UnfitJob(n, m) = insP(k) 'инвентарный номер удаляемого инструмента
End If
End If
Next k
Next j
MIna = f 'количество инструментов, необходимых для новой работы и уже имеющихся в магазине
MNew = 0 ' количество вновь устанавливаемых инструментов для работы
...
Next i

```

Рис. 7.11 Проверка использования инструментов в магазине

ходимости. Если требуемого инструмента в магазине нет, или его износ слишком велик, то программа автоматически обращается к складу инструмента (рис. 7.12).

Если годный инструмент находится на складе и степень его износа с учетом новой работы меньше 100%, то его инвентарный номер записывается в массив *MagJob()*. Если износ инструмента на складе слишком велик, для проведения операции необходимо провести переточку инструмента (рис. 7.13). Восстановленный инструмент с учетом задержки времени на переточку записывается в массив *MagJob()*.

Если все необходимые инструменты могут быть подобраны, такая работа может осуществляться и можно определить параметры узла (рис. 7.14). Начало работы в каждом узле рассчитывается с помощью функции *Calend()* и запоминается в массиве *Tk()*, причем точность определения времени, как обычно, составляет 0,1 часа. При определении момента поступления заготовок на машину используется функция *Arrival()*. Момент окончания работы в календарных часах определяется также с помощью функции *Calend()*.

```

If FlagJ = 0 Then ' если инструмент текущего типа ставится в магазин заново
Waste = 0 'износ
Tools = 0 'номер инструмента
For l = 1 To BetaN 'цикл по инструменту на складе
If insV(l) = Typ Then 'если найден инструмент нужного типа
FlagJ = 2 'флаг нахождения инструмента необходимого типа на складе
If insZ(l) + Ekes <= 100 Then ' проверка возможности выполнения работы с одной сменой имеющегося инструмента
f = f + 1 'порядковый номер в списке инвентарных номеров инструмента для текущей работы
MagJob(n, f) = Inv(l) 'запись инвентарного номера инструмента в массив магазина для текущей работы
TapozJob(n, f) = insZ(l) + Ekes 'запоминание текущего износа
FlagJ = 1 'флаг установки инструмента без восстановления
NNew = NNew + 1 'установка нового инструмента для работы
l = BetaN 'прекращение цикла
Else 'если износ инструмента не дает возможности выполнить работу полностью
If Inv(l) <> invN Then 'если инструмент на складе не является удаленным из магазина на текущей операции
If insZ(l) > Waste Then 'если у инструмента износ больше износа ранее найденного инструмента
Waste = insZ(l) 'запоминание наибольшего износа
Tools = Inv(l) 'запоминание номера инструмента с наибольшим износом
End If
End If
End If
End If
Next l
End If

```

Рис. 7.12 Поиск необходимого инструмента на складе

```

If FlagJ = 2 Then ' если инструмент необходимого типа на складе ..... есть
f = f + 1 'порядковый номер в списке инвентарных номеров инструмента для текущей работы
If Tools = 0 Then 'если на складе есть только инструмент удаленный из магазина
FlagP = FlagP + 1 ' учет времени задержки на переточку
MagJob(n, f) = insN 'замена инструмента в магазине после переточки
Else
MagJob(n, f) = Tools 'запись инвентарного номера другого инструмента в массив магазина текущей работы
End If
IznozJob(n, f) = Ekes 'запоминание текущего износа предварительно восстановленного инструмента
End If

```

Рис. 7.13 Переточка инструмента

```

If aJ(i) = 0.5 Then 'для выполняемых работ
If Vid(i) = Vid0 Then 'если тип оснастки для текущей работы совпадает с начальным типом оснастки
Tk(n) = Calend(K0, Round((Tt + FlagP * Tu) / 60, 1), 1)
'учет начального обращения к складу и времени на переточку в часах
UStage(n) = CH * (Tt + (FlagP * Tu + setD(Vid(i)) * Kol(i) + Tc * NNew) / 60) / C
'относительные затраты на подготовку работы, переустановку деталей и смену инструмента в часах
Else 'если тип оснастки для текущей работы не совпадает с начальным типом оснастки
Tk(n) = Calend(K0, Round((Tt + FlagP * Tu + s(Vid(i))) / 60, 1), 1)
'учет начального обращения к складу, времени на переточку и времени переустановки оснастки в часах
UStage(n) = CH * (Tt + FlagP * Tu / 60 + s(Vid(i)) / 60 + (setD(Vid(i)) * Kol(i) + Tc * NNew) / 60) / C
'относительные затраты на подготовку работы, переустановку оснастки и деталей и смену инструмента в часах
End If
sngDur = Arrival(R(i)) 'момент поступления работы на машину
If sngDur > Tk(n) Then 'учет времени поступления заготовки (материала)
Tk(n) = sngDur 'возможный момент начала работы машины в календарных часах
End If
CompStage(n) = Calend(Tk(n), (POper(i) + Tv * NOper(i)) / 60 * Kol(i), 2)
'время выполнения работы в часах с учетом времени срабатывания механизма смены инструмента
If CompStage(n) = 0 Then 'если не определен момент окончания работы
MsgBox "недостаточен рабочий горизонт"
Exit Sub
End If
VStage(n) = (V0 * K0 + Vzsk(Beta, i, sngCl, Tk(n), CompStage(n))) / CompStage(n) 'полезность набора работ
ParStage(n) = 0 'родительский узел
NPStage(n) = i 'номер строки работы
NodeStage(n) = 1 'номер узла
aJ(i) = 1 'возврат метки проведения работы
End If

```

Рис. 7.14 Определение параметров узла

Отсечение узлов по критериям, как и в главе 5, производится в рамках двойного цикла (рис. 7.15). Отсечение проводится в соответствии с правилами, описанными в п.п. 3.4.1, 3.4.2 и 3.4.3.

Оставшиеся ветви на первом уровне, имеющие метку  $MetCurStage(j) = 0$ , пересчитываются и их параметры переносятся в шесть выше перечисленных массивов недоминируемых узлов (рис. 7.16).

Однако в данном случае этого переноса недостаточно, и для полной характеристики каждого созданного узла дерева необходимо описать соответствующий набор инструментов в магазине и процент износа инструментов. Для этого программа последовательно выполняет несколько операций.

```

intU = n 'начальное возможное количество узлов разветвления на первом уровне'
intM = intU 'наибольшее возможное количество разветвления узлов на первом уровне'
For j = intU To 1 Step -1 'нахождение недоминируемых узлов первого уровня'
For i = 1 To intU
If i <> j And MetCurStage(i) = 0 Then 'для недоминируемых узлов
If UStage(j) >= UStage(i) And VStage(j) <= VStage(i) And qs(NPStage(j)) >= qs(NPStage(i)) Then
'условие доминирования
intM = intM - 1 'количество разветвления узлов первого уровня'
MetCurStage(j) = 1 'метка доминирования над текущей работой'
i = intU 'выход из цикла'
End If
End If
Next i
Next j

```

Рис. 7.15 Механизм отсечения первого уровня

```

n = 0
For i = 1 To intU
  If MetCurStage(i) = 0 Then
    n = n + 1
    TreeStage(n) = 1          'номера разветвляемых узлов первого уровня'
  End If
Next i
For i = 1 To intN ' по разветвляемым узлам первого уровня
  k = TreeStage(i) 'номер исходного узла
  U(i) = UStage(k) 'включение недоминируемых узлов первого уровня в полные массивы недоминируемых узлов
  V(i) = VStage(k)
  Par(i) = ParStage(k)
  Commen(i) = Tk(k)
  Comp(i) = CompStage(k)
  NP(i) = NPStage(k)
  Node(i) = NodeStage(k)
  m = NOper(NP(i)) ' количество инструментов для работы
  ...
  TreeStage(i) = i 'номера узлов полных массивов, соответствующих недоминируемым узлам первого уровня'
Next i

```

**Рис. 7.16** Перенос параметров узлов первого уровня в полные массивы дерева

Прежде всего, при переходе к каждому узлу, по предыдущему состоянию восстанавливается величина износа всех инструментов, в гнездах магазина записываются находившиеся там инструменты (рис. 7.17).

Затем, программа, используя массив *MagJob()*, подсчитывает количество инструментов, используемых от предыдущей работы для выполнения работы в новом узле, а также удаляет из массива магазина *MagStage()* инструменты, намеченные к удалению в массиве *UnfitJob()* (рис. 7.18). После этого программа получает возможность откорректировать состав магазина и определить степень износа инструмента, используемого при проведении текущей работы (рис. 7.19).

В фрагменте на рис. 7.19 для каждого инструмента в магазине и используемого в текущей работе записывается новое значение износа. Если в магазин вставляется новый инструмент, то для него определяется целесообразное место (гнездо) и также записывается значение износа. Для определения рационального гнезда используется массив *VarMag()*, в котором порядок гнезд установлен в соответствии с частотой применения находящегося в магазине инструмента *Freq()* (рис. 7.10).

По окончании подготовки магазина и инструмента в каждом узле первого уровня необходимо пересчитать частоту использования инструментов в магазине для построения следующего уровня (рис. 7.20). Номера гнезд, отсортированные по частоте установленных в них инструментов, записываются в двумерном массиве *VarMag()*.

На последующих уровнях построения дерева решений все этапы программы первого уровня повторяются с некоторыми изменениями. В частности, могут использоваться параметры огра-

```

For j = 1 To BetaN 'по всем инструментам
  IznosStage(i, j) = insZ(j) ' предварительная запись для всех инструментов по предыдущему состоянию
Next j
For j = 1 To Vins ' по всем гнездам магазина
  MagStage(i, j) = insP(j) 'в состав магазина при выполнении новой работы
  'перелистывается инструмент из предыдущего набора в магазине
Next j

```

**Рис. 7.17** Предыдущее состояние инструмента и магазина

```

ShiftIns = 0 'количество размещенных инструментов
For j = 1 To Vins ' по всем гнездам магазина
For l = 1 To m ' по всем инструментам работы
If InSP(j) = MagJob(k, l) Then 'если нужен для новой работы инструмент уже есть в магазине
ShiftIns = ShiftIns + 1 'количество инструментов, используемых от предыдущей работы
l = m 'конец цикла
End If
Next l
Next j
For j = 1 To Vins 'по возможному массиву удаленного инструмента
If UnfitJob(k, j) > 0 Then 'для удаления из магазина инструментов
ShiftM = Determin(Vins, UnfitJob(k, j)) 'нахождение в списке магазина
If ShiftM > 0 Then
MagStage(i, ShiftM) = 0 'удаление использованного инструмента из магазина
End If
Else
j = Vins 'конец цикла по инструментам
End If
Next j

```

Рис. 7.18 Определение используемых и удаляемых инструментов в новом узле

```

Shift = 0 'счетчик вновь устанавливаемых инструментов
For j = 1 To Vins ' по всем гнездам магазина
FlagI = 0 'флаг необходимости ранее установленного инструмента
For l = 1 To m ' по всем инструментам работы (операциям)
If InSP(j) = MagJob(k, l) Then 'нужный инструмент в магазине нужен для работы
ShiftM = Determin(BetaM, MagJob(k, l)) 'нахождение в списке инструмента
InnosStage(i, ShiftM) = InnosJob(k, l) ' новое значение износа
FlagI = 1 'установка флага использованного инструмента из предыдущего набора магазина для нового набора магазина
l = m 'конец цикла
End If
Next l
If FlagI = 0 And ShiftIns < m Then 'инструмент в гнезде магазина не нужен для работы
'и количество инструментов в списке для работы меньше необходимого
Shift = Shift + 1
ShiftIns = ShiftIns + 1 'внесенное количество инструментов в списке для новой работы
MagStage(i, VarMag(Shift)) = MagJob(k, ShiftIns) ' инструмент в гнезде заменяется на
'новый инструмент из списка для новой работы
ShiftM = Determin(BetaM, MagJob(k, ShiftIns)) 'нахождение в списке инструмента
InnosStage(i, ShiftM) = InnosJob(k, ShiftIns) ' новое значение износа для вновь установленного инструмента
End If
Next j

```

Рис. 7.19 Подготовка состава магазина и степени износа инструмента к следующему уровню построения дерева

ничения вариантов по длительности согласно п. 3.4.4, механизм которых ограничений подробно описан в главе 5 (рис. 5.20 и 5.21).

В каждом узле разветвления определяются номер строки работы, расчетная полезность и момент окончания работы. Кроме того, последовательно переходя по цепочке, программа восстанавливает перечень уже выполненных работ (рис. 7.21).

Механизм отсека на уровнях выше первого полностью совпадает с механизмом, приведенным выше на рис. 5.24. Остающиеся ветви, как обычно, пересчитываются и переносятся в полные массивы недоминируемых узлов дерева решений. На каждом уровне производится подготовка состава магазина и степени износа инструмента перед расчетом следующего уровня, также ранжирование гнезд по частоте использования установленного в них инструмента.

```

For i = 1 To intN ' по узлам первого уровня
For j = 1 To BetaN ' по всем инструментам
insZ(1, j) = IznosStage(1, j) ' заполнение массива износа на первом уровне
Next j
For j = 1 To Vina 'по магазину
insP(1, j) = MagStage(1, j) ' заполнение массива инструментов в магазине на первом уровне
If insP(1, j) = 0 Then
Freq(1, j) = 0
Else
Shift = Determin(BetaN, insP(1, j)) 'индекс в списке инструментов
Freq(1, j) = KolTyp(insV(Shift)) 'частота использования инструмента
End If
Next j
...
Next i

```

Рис. 7.20 Частота использования инструмента в магазине в узлах первого уровня

```

For intZ = 1 To intN
k = TreeStage(intZ) 'индекс по узлам разветвления на уровне'
Job = NP(k) 'номер недоминируемого узла дерева на текущем уровне'
sngVz = V(TreeStage(intZ)) 'расчетная полезность в созданном узле '
C1 = Comp(TreeStage(intZ)) 'момент окончания работы в узле
For i = 1 To Beta
aJ(i) = 1 'начальная установка меток работ на невыполнение'
Next i
Do Until k = 0
aJ(NP(k)) = 0 'метка выполненной работы в узлах до корня цепочки'
k = Par(k) 'переход по цепочке'
Loop
...
Next intZ

```

Рис. 7.21 Восстановление цепочки в узле разветвления

После окончания построения дерева решений определяется область расположения вариантов решения на листе и производится сортировка вариантов по убыванию массива  $V()$  критерия полезности. Для полученного набора вариантов проводится поиск наиболее целесообразного варианта методами Сэвиджа и Гурвица, полученные результаты печатаются на листе MS Excel.

Полученные решения содержат последовательность выполнения работ, однако из них непосредственно не следует состав магазина для выполнения каждой работы. Такой состав можно получить для выбранного варианта решения (рис. 7.22).

При таком расчете сначала восстанавливаются данные о частоте использования инструментов, находящихся в гнездах магазина на момент планирования (рис. 7.10) и массиве VarMag номеров гнезд, отсортированных по этой частоте. Затем в цикле по последовательности работ выбранного варианта повторяются все элементы программы, описанные на рис. 7.11 – 7.13.

Переходя к каждому последующему узлу цепочки, по предыдущему состоянию восстанавливается величина износа всех инструментов, и инструменты в магазине (рис. 7.17), определяется список используемых и удаляемых инструментов в новом узле (рис. 7.18) и готовится состав магазина к следующему уровню построения дерева (рис. 7.19). Параметры вновь рассчитанного узла выводятся на лист Excel, частота использования инструментов в магазине пересчитывается для построения следующего уровня (рис. 7.20).

В конце расписания указывается общее количество заново устанавливаемых инструментов, необходимых для выполнения всех заданных операций.

```

n = Cells(1, "O").Value      'номер варианта'
y = Cells(1, "P").Value      'номер последней выполняемой работы'
k = TreeStage(VarNumber(n))  'последний узел выбранного варианта'
Tk(Beta) = Commen(k)         'начало последней работы'
CompStage(Beta) = Comp(k)     'окончание последней работы'
NPStage(Beta) = NP(k)        'номер строки последней работы'
i = Beta 'количество работ'
Do Until Par(k) = 0 'цикл до начала дерева '
    k = Par(k) 'родительский узел
    i = i - 1 'отсчет от последней работы
    Tk(i) = Commen(k)         'начало работы в цепочке'
    CompStage(i) = Comp(k)    'окончание работы в цепочке'
    NPStage(i) = NP(k)        'номер строки заказов в цепочке'
Loop

```

Рис. 7.22 Восстановление параметров цепочки выбранного варианта

## 7.7 Перепланирование расписания

Рассмотрим составление расписания при любом изменении начальной даты планирования. Такое изменение возможно как при появлении нового календарного задания, так и при необходимости выполнения срочной работы.

Пусть для задания на листе 1, состоящего из пятнадцати работ, выбран вариант расписания 2, который успешно выполнялся в течение первого дня, а к концу дня появился срочный заказ №16. Согласно календарному графику на листе 1, в первый день работали 2 смены с общей длительностью в 16 часов и к концу дня были полностью выполнены работы 1 и 2, а работа 3 выполнена на 75%. Для перепланирования необходимо, во-первых, установить текущее состояние магазина и степень износа всех инструментов, и во-вторых, откорректировать набор работ и соответствующий список операций.

Для этой цели следует откопировать лист 1 в лист 2 и убрать с него результаты предыдущего расчета. При запуске макроса на листе 2 программа сообщает о дате предыдущего расчета и спрашивает о необходимости нового расчета. Отвечая положительно, переходим к форме на рис. 7.23. В этой форме необходимо указать дату, на которую будет проведено планирование, ячейки списка работ и порядковый номер последней выполняемой работы. В данном случае, в первый рабочий день последней выполняется работа 3, которая имеет в варианте 2 порядковый номер 3 (рис. 7.6).

На следующем шаге пересчета необходимо перейти к подготовке магазина. В этом случае в цикле по последовательности выбранного варианта вплоть до последнего заданного номера

Рис. 7.23 Форма подготовки к новому планированию

работы включительно повторяются все элементы программы, описанные на рис. 7.11 – 7.13. При этом в список инструментов вносятся значения износа, а соответствующие изменения записываются в состав магазина.

В табл. 7.1 приведено сравнение первоначального набора инструментов в магазине и соответствующего набора на этапе выполнения работы, указанной в форме на рис. 7.23.

Из табл. 7.1 видно, как изменился состав магазина на третьем этапе выполнения работ. Прежде всего, новые инструменты вставлены в пустые гнезда 2 и 7. Инструмент 10, выработавший свой ресурс, удален из магазина, некоторые инструменты (13, 9, 26) заменены другими. Одновременно с изменением состава магазина производятся изменения в списке учета износа инструментов.

После подготовки магазина нужно откорректировать список работ, операций и календарный график. На рис. 7.24 приведен список работ с учетом их выполнения и появления новой работы.

В календарном графике необходимо сдвинуть всю таблицу на одни сутки влево и изменить дату планирования. В списке операций следует убрать операции для работ 1 и 2, а также добавить все необходимые операции для работы 16. После этого необходимо повторно вызвать форму на рис. 7.23 и обязательно откорректировать в ней имя последней ячейки переносимого списка. В данном случае вместо G19 необходимо указать G20. Если дата календарного графика совпадает с датой в форме, программа автоматически изменит список работ и откорректирует момент готовности и поступления (рис. 7.25).

Как видно из рис. 7.25, несколько работ уже просрочены, для вновь поступившей срочной работы установлен весовой коэффициент 3. После проведенной подготовки можно вызвать программу в режиме планирования, причем необходимо тщательно откорректировать форму ввода данных (рис. 7.26).

При перепланировании обязательно необходимо откорректировать имя последней ячейки списка работ, ячейки списка операций, тип оснастки на момент планирования, момент освобождения машины и момент планирования. Тип оснастки должен соответствовать последней выполняемой работе. Если считается возможным прервать уже начатую, но не законченную,

**Таблица 7.1** Изменение в составе магазина

Номер места	Инв. номер инструмента в начальном наборе	Инв. номер инструмента на этапе, указанном на рис. 7.23
1	3	3
2	0	6
3	1	1
4	4	4
5	7	24
6	5	5
7	0	14
8	2	2
9	10	15
10	13	18
11	21	21
12	9	20
13	17	17
14	26	16
15	8	8

№ работы	Требуемый момент готовности и час.	Ожидаемый момент поступления ния час.	Количество во, шт.	Весовой коэффициент	Тип оснастки	Выполнение ние, %
1	-1	-4	15	3	1	100
2	5	0	10	1	4	100
3	8	1	15	1	2	75
4	14	0	20	1	1	0
5	18	0	10	1	3	0
6	28	3	15	1	1	0
7	35	2	10	1	2	0
8	42	0	20	1	1	0
9	53	8	10	1	4	0
10	60	7	10	1	2	0
11	74	7	15	1	1	0
12	85	5	20	1	3	0
13	96	9	20	1	1	0
14	106	10	10	1	2	0
15	112	10	15	1	1	0
16	24	15	16	3	3	0

Рис. 7.24 Список работ по результатам первого рабочего дня

№ работы	Требуемый момент готовности и час.	Ожидаемый момент поступления ния час.	Количество во, шт.	Весовой коэффициент	Тип оснастки	Выполнение ние, %
3	-16	0	15	1	2	75
4	-10	0	20	1	1	0
5	-6	0	10	1	3	0
6	4	0	15	1	1	0
7	11	0	10	1	2	0
8	18	0	20	1	1	0
9	29	0	10	1	4	0
10	36	0	10	1	2	0
11	50	0	15	1	1	0
12	61	0	20	1	3	0
13	72	0	20	1	1	0
14	82	0	10	1	2	0
15	88	0	15	1	1	0
16	0	0	16	3	3	0

Рис. 7.25 Откорректированный список работ для перепланирования

Ввод данных

Психологический коэффициент 0,1	Длительность планового периода в днях 3	Количество рабочих смен 2	Стоимость часа времени наладки 3	Стоимость рабочей смены 8	
Трудоемкость установки одного инструмента, мин. 4	Длительность обращения к складу, мин. 20	Длительность перемещения на операцию, мин. 1	Продолжительность восстановления инструмента, час 10	Количество типов инструмента 20	
Имя первой ячейки списка работ A5	Имя последней ячейки списка работ G18	Имя первой ячейки списка операций I5	Имя последней ячейки списка операций L88	Имя первой ячейки рабочего календаря V31	Имя последней ячейки рабочего календаря AZ34
Имя первой ячейки типов оснастки X5	Имя последней ячейки типов оснастки Z8	Имя первой ячейки текущего набора инструментов O5	Имя последней ячейки текущего набора инструментов Q34	Имя первой ячейки текущего набора в нагазике S5	Имя последней ячейки текущего набора в нагазике T19
Тип оснастки на момент планирования 2	Начало рабочего дня, часы 8	Момент освобождения в календарных часах 8	Момент планирования 17.09.16 8:00	Имя ячейки результата расчета J100	
Текущие параметры OK	Ввод данных в Excel OK	Запуск программы OK	Выход из программы OK		

Рис. 7.26 Форма корректировки параметров задачи

работу, то момент освобождения машины следует считать равным началу рабочего дня. В противном случае, эту работу следует считать выполненной на 100%, но момент освобождения машины устанавливать с учетом ее окончания.

В данном случае, после перепланирования программа предлагает восемь возможных вариантов расписания (рис. 7.27).

Из рис. 7.27 следует, что при перепланировании программа в первых трех вариантах предлагает сначала закончить работу 3, а затем перейти к выполнению срочной работы 16. Поскольку для работы 16 требуется установка оснастки типа 3, которая нужна и для работ 5 и 12, программа предлагает выполнить и эти работы, и после этого перейти к работе 6. В других вариантах предлагается не спешить с работой 16, а постепенно перейти к этой работе по мере смены оснастки и инструментов.

Недоминируемые варианты														
Вариант 1:	3	16	5	12	6	13	15	11	4	7	14	8	9	10
Вариант 2:	3	16	5	12	6	13	15	11	4	7	14	10	8	9
Вариант 3:	3	16	5	12	6	13	15	7	10	14	11	4	8	9
Вариант 4:	3	7	16	12	5	13	15	11	10	14	4	6	8	9
Вариант 5:	3	7	16	12	5	9	14	10	11	6	15	8	4	13
Вариант 6:	3	7	14	10	16	12	6	15	4	11	5	9	8	13
Вариант 7:	3	7	14	10	16	12	6	15	11	5	9	8	13	4
Вариант 8:	3	7	14	10	16	12	6	15	13	5	9	4	8	11

Рис. 7.27 Результаты работы программы на листе 2

## 7.8 Моделирование расписания

Для моделирования применяются ограничители ветвления  $B1$ ,  $B2$  и  $B3$ , используемые в листинге аналогичной методики, изложенной выше в п. 5.8. Для исходных данных приведенного примера влияние этих ограничителей незначительно. Поэтому в настоящем параграфе остановимся только на рассмотрении горизонта планирования.

В исходных данных листа 1 работы отсортированы по моменту выполнения. Поэтому при изучении влияния горизонта можно ограничиться составлением расписаний для изменяющегося количества работ. Используя форму ввода на рис. 7.3, можно задавать различное количество планируемых работ. Например, для трех работ форма имеет вид на рис. 7.28, на котором отредактированы имя последней ячейки списка работ и имя последней ячейки списка операций. После выполнения программы можно вручную переписать полученные результаты по показателям вариантов расписания в различные ячейки листа для анализа.

На листе 3 построен график изменения загрузки машины в зависимости количества работ на горизонте (рис. 7.29).

Из рис. 7.29 следует, что машина существенно перегружена, причем средняя величина коэффициента загрузки составляет примерно 1,2.

На рис. 7.30 приведен график параметров расписаний для разных горизонтов.

Приведенные затраты на рис. 7.30 растут с количеством работ почти в линейной зависимости. Величина средней полезности набора работ при малом количестве планируемых работ близка к нулю, затем падает до -1 и далее колеблется около значения -0,8. Коэффициент группирования также меняется мало и в среднем находится около величины 1.6.

Исходя из результатов на рис. 7.30, можно полагать, что для данного примера величина работ, учитываемая при планировании, не достигла критического значения, и, в принципе, может и дальше увеличиваться.

Ввод данных

Положительный коэффициент	Длительность планового периода в днях	Количество рабочих смен	Стоимость часа времени наладки	Стоимость рабочей смены	
0,1	3	2	3	8	
Трудоемкость установки одного инструмента, мин.	Длительность обращения к складу, мин.	Длительность переключения на операцию, мин.	Продолжительность восстановления инструмента, час	Количество типов инструмента	
4	20	1	10	20	
Имя первой ячейки списка работ	Имя последней ячейки списка работ	Имя первой ячейки списка операций	Имя последней ячейки списка операций	Имя первой ячейки рабочего календаря	Имя последней ячейки рабочего календаря
A5	G7	I5	L20	V31	AI34
Имя первой ячейки типов оснований	Имя последней ячейки типов оснований	Имя первой ячейки имеющегося набора инструментов	Имя последней ячейки имеющегося набора инструментов	Имя первой ячейки текущего набора в магазине	Имя последней ячейки текущего набора в магазине
X5	Z8	05	Q34	S5	T19
Тип оснований на момент планирования	Начало рабочего дня, часы	Момент освобождения в календарных часах	Момент планирования	Имя ячейки результата расчета	
3	8	10	16.09.2016	J100	
Текущие параметры	Ввод данных в Excel	Запуск программы	Выход из программы		
OK	OK	OK	OK		

Рис. 7.28 Форма ввода для трех работ

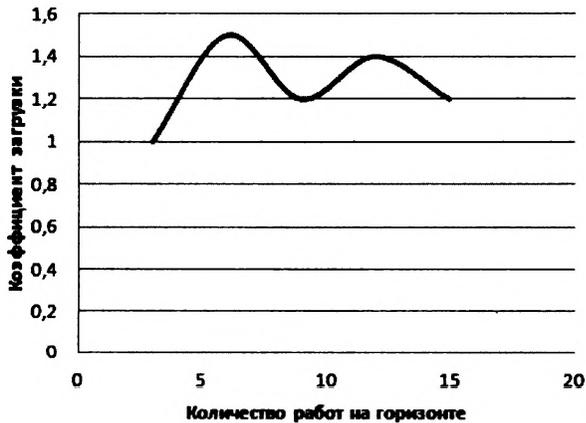
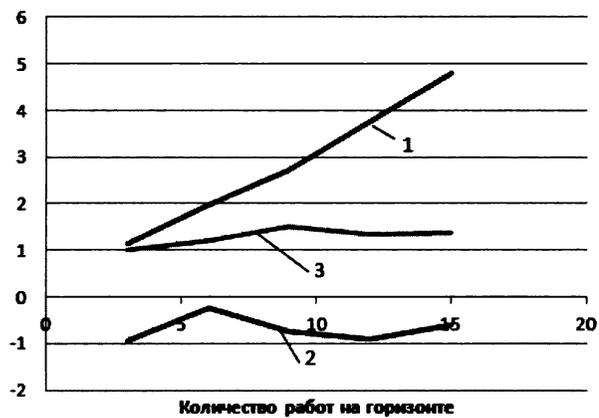


Рис. 7.29 График загрузки машины



**Рис. 7.30** Параметры расписаний для разных горизонтов: 1 – приведенные затраты переналадок; 2 – полезность выполняемого набора работ; 3 – коэффициент группирования.

# Расписания для параллельных машин

8.1 Введение .....	145	8.3.2 Работа с программой .....	165
8.2 Расписания для параллельных машин с последовательным выполнением работ .....	146	8.3.3 Анализ результатов планирования .....	166
8.2.1 Исходные данные задачи .....	146	8.3.4 Листинг основной части программы .....	168
8.2.2 Работа с программой .....	148	8.3.5 Перепланирование расписания .....	172
8.2.3 Анализ результатов планирования .....	149	8.3.6 Моделирование расписания .....	173
8.2.4 Листинг основной части программы .....	152	8.4 Расписания для параллельных машин с перенастраиваемым формоизменяющим инструментом .....	174
8.2.5 Перепланирование расписания .....	157	8.4.1 Исходные данные задачи .....	175
8.2.6 Моделирование расписания .....	159	8.4.2 Работа с программой .....	176
8.3 Расписания для параллельных машин с работой «на склад» .....	162	8.4.3 Листинг основной части программы .....	178
8.3.1 Исходные данные задачи .....	163	8.4.4 Перепланирование расписания .....	182

## 8.1 Введение

Участок, на котором находятся несколько машин одного назначения, создается при достаточно большом объеме выполнения аналогичных работ. Возможность загрузки нескольких машин является важнейшим ресурсом, который постепенно расходуется в течение каждой рабочей смены. Кроме этого ресурса, участок нуждается и в некоторых других, прежде всего, в цеховом персонале, а также в материалах, энергии и т.п. Время работы участка также является ресурсом и ограничено календарным графиком. Все эти ресурсы ограничены и, соответственно, должны учитываться при составлении расписания.

Расходование ресурсов существенно уменьшается при использовании группового планирования. Если, например, на одной машине должна последовательно проводиться группа из нескольких работ (заказов) по изготовлению одного и того же продукта, то время переналадки между этими работами равно нулю, и вся группа таких заказов превращается в одну партию изготовления. Такой вид группирования характерен при планировании «под заказ» для оборудования, применяемого для резки, штамповки, отливки деталей из пластмасс и т.п.

Группирование возможно также при планировании «на склад», что характерно для процессного производства, изготовления метизов, крепежа, инструментов и т.д. В этих случаях, как правило, минимальный объем совместно изготавливаемого продукта составляет т.н. «техническую» партию и определяется, например, объемом машины, размером упаковки, величиной транзитной нормы и т.п. С экономической точки зрения рационально объединять технические партии каждого продукта в группы, которые можно выпускать без переналадки оборудования.

Разработка группового расписания для нескольких не одинаковых параллельных машин, на которых возможно изготовление различных продуктов, является очень сложной задачей, поскольку здесь одновременно необходимо распределять продукты по машинам и объединять

партии продуктов (работы) в группы. Естественно, что при составлении расписания необходимо руководствоваться некоторыми критериями оптимизации, определение которых не очевидно.

Поскольку причиной появления групповых способов обработки является стремление найти рациональный компромисс между высоким уровнем (своевременностью) выполнения заказов и низкой стоимостью производства, необходимость одновременного выполнения этих требований при планировании представляет собой описанную выше «дилемму планирования», решение которой в принципе не может быть получено в однокритериальной постановке.

В настоящей главе последовательно используется динамический метод группового планирования, описанный в главе 3. Здесь рассматриваются три задачи составления расписания для не одинаковых параллельных машин, причем учитывается как необходимость своевременного выполнения каждой работы, так и экономия затрат на переналадку машины.

## 8.2 Расписания для параллельных машин с последовательным выполнением работ

Рассмотрим относительно простую задачу составления расписания для нескольких не одинаковых параллельных машин при последовательном выполнении работ, прибытие которых запланировано в различное время  $r_i$ . При этом учитывается как необходимость своевременно-го завершения каждой работы с заданным сроком выполнения  $d_i$ , так и экономия затрат на переналадку машины.

Согласно известной структурной формуле теории расписаний, поставленная задача для дискретного типа производства может быть записана как

$$R|r_i, d_i, s_{ikl}|U, \bar{V}, \quad (8.1)$$

где  $R$  – любое возможное количество не одинаковых параллельных машин;  $s_{ikl}$  – трудоемкость переналадки с работы  $k$  на работу  $i$  для машины  $l$ ;  $U$  – относительные затраты для выполнения всех работ;  $\bar{V}$  – средняя полезность заказов за время выполнения расписания.

В данном случае целевых функций две, причем их одновременное улучшение возможно только в определенных пределах. Таким пределом является т.н. Паретовская компромиссная кривая, в точках которой улучшение (уменьшение) функции  $U$  всегда связано с ухудшением (уменьшением) значения  $\bar{V}$ .

Для расчета расписания используется компьютерная программа на основе функций полезности, описанных выше в главе 3. Программа представляет собой макрос на языке VBA для электронной книги MS Excel. Рабочее задание записывается на листе MS Excel; после выполнения программы результат записывается этом же листе и на формах книги.

### 8.2.1 Исходные данные задачи

Исходные данные для составления расписания настоящей задачи записываются на листе MS Excel электронной книги MBook4.xls. Эта книга в состоянии поставки состоит из пяти листов, на которых иллюстрируются различные аспекты составления расписаний.

На листе 1 в табл. \$A\$5:\$L\$44 находится задание, состоящее из сорока работ шести различных видов, фрагмент которого приведен на рис. 8.1. В каждой строке задания описываются параметры работ: номер работы; требуемый момент день готовности; ожидаемый момент поступления заготовки в календарных днях; вид работы; весовой коэффициент работы и выполнение работы в процентах. Для каждой из работ приведено время выполнения работы на

соответствующей машине. Если работа на какой-то из машин не может быть выполнена, в соответствующей графе записывается значение -1. Целесообразно записывать работы в порядке возрастания требуемых дат их выполнения.

Моменты готовности и поступления работ отсчитываются от момента наступления календарного дня, являющегося первым в расписании. Под видом работы понимается, например, конструкторское обозначение детали, или другой параметр работы, вызывающий необходимость в переналадке машины.

В табл. 8.1 приведены нормы времени в часах на переналадку с одного вида работы на другой для каждой из шести машин. При этом полагается, что номер предыдущего вида работы устанавливается по столбцу таблицы, а номер последующего вида работы – по строке таблицы.

В табл. 8.2 записаны данные каждой из машин. Поскольку загрузка участка невелика, часть машин находятся в отключенном состоянии. По каждой работающей машине приведены данные о ее настройке на конкретный вид работ на момент планирования (начало нового рабочего дня) и ожидаемый момент освобождения.

В табл. 8.3 описан календарный график работы машины по дням, начинающийся с первого дня выполнения составляемого расписания. Для каждой смены календарного дня проставлено количество рабочих часов, для каждой машины указано плановое время проведения технического обслуживания. В приведенном примере предусмотрена двухсменная работа с восьмичасовым рабочим днем.

На листе 2 приведен возможный вариант перепланирования этого задания. На листе 3 находится задание для 60 работ, для этого примера на листе 4 проводится моделирование по различным параметрам. На листе 5 приведен пример моделирования с целью нахождения рационального горизонта планирования.

Обозначение работы	Требуемый календарный день готовности после начала	Споздаваемый календарный день поступления после начала	Вид работы	Весовой коэффициент	Отметка выполне ния	Трудоемкость в нормочасах					
						Машина 1	Машина 2	Машина 3	Машина 4	Машина 5	Машина 6
						1	2	3	4	5	6
1	-1	0	1	4	0	2	3	3	3	4	4
2	0	0	2	3	0	2	3	3	3	4	4
3	1	0,5	1	1	0	1	2	2	-1	3	3
4	1	0	5	1	0	-1	4	4	4	5	5
5	1	0	1	1	0	1	2	1	1	3	3
6	1	1	2	1	0	2	-1	-1	3	4	4
7	1	0	3	1	0	1	2	2	2	3	3
8	2	1	1	1	0	-1	3	3	3	-1	-1
9	2	0	1	1	0	3	4	4	4	5	5
10	2	0	3	1	0	1	3	3	3	4	4
11	2	0	4	1	0	1	3	3	3	4	4
12	2	1	3	1	0	-1	-1	2	2	3	3
13	2	0	5	1	0	3	4	4	4	4	4
14	2	0	3	1	0	2	3	3	3	4	4
15	2	0	6	1	0	1	2	2	2	3	3

Рис. 8.1 Фрагмент исходного задания на листе 1

## 8.2.2 Работа с программой

Для работы с программой планирования в MS Excel устанавливается соответствующий рабочий лист, например, лист 1 и осуществляется запуск макроса. При выборе опции «без моделирования», система сообщает о последней дате планирования и предлагает одну из двух возможностей – подготовку планирования с новой датой или повторение расчета с последней датой.

В форме «Ввод данных» задаются основные параметры процесса. Система автоматически рассчитывает загрузку участка (по включенным машинам) и выдает соответствующее сообщение. По окончании расчета все возможные и недоминируемые варианты выводятся на лист (рис. 8.2).

В каждом варианте работы сгруппированы по видам, а группы разделены пробелами. Внутри группы последовательность работ не обязательно совпадает с порядком их номеров, поскольку работы в одной группе могут иметь различную трудоемкость. Если резерв времени выполнения всех работ в одной группе положительный, то система иногда рекомендует выполнять сначала работы с меньшей трудоемкостью с тем, чтобы понизить суммарную длительность производственного цикла.

Например, в случае варианта 1 на первой (самой производительной) машине запланировано выполнение 16 работ из общего числа в 40 работ. На машине 4 (средней производительности) должны быть выполнены 13 работ; наконец, на машине 6 (низкой производительности) запланированы остальные 11 работ. На каждой из машин работы сгруппированы по видам: на машине 1 таких групп 5, на машине 4 – 4 группы, на машине 6 – только 3 группы.

Последовательность выполнения работ внутри каждой из групп диктуется, прежде всего, требуемой датой выполнения, а также моментом поступления заготовки и трудоемкостью ра-

Недоминируемые варианты			
Вариант 1	Машина 1:	1,5,3,19,38,9, 11,24,33,26,17, 15,22, 20,30, 25	
Вариант 1	Машина 4:	2,21,6,29,16,40,31, 8,27,32, 28,36, 39	
Вариант 1	Машина 6:	7,12,35,10,14,23,18, 13,4,37, 34	
Вариант 2	Машина 1:	1,5,3,19,38,9, 11,24,33,26,17, 15,22, 20,30, 25, 39	
Вариант 2	Машина 4:	2,21,6,29,16,40,31, 8,27,32, 28,36	
Вариант 2	Машина 6:	7,12,35,10,14,23,18, 13,4,37, 34	
Вариант 3	Машина 1:	1,5,3,19,38,9, 11,24,33,26,17, 15,22, 20,30, 25	
Вариант 3	Машина 4:	2,21,6,29,16,40,31, 8,27,32, 28,36	
Вариант 3	Машина 6:	7,12,35,10,14,23,18, 13,4,37, 34, 39	
Вариант 4	Машина 1:	1,5,3,19,38,9, 11,24,33,26,17, 15,22,28,36, 30,37	
Вариант 4	Машина 4:	2,21,6,29,16,40,31, 8,27,32, 25,34	
Вариант 4	Машина 6:	7,12,35,10,14,23,18, 13,4,20, 39	
Вариант 5	Машина 1:	1,5,3,19,38,9, 11,24,33,26,17, 15,22,28,36, 30	
Вариант 5	Машина 4:	2,21,6,29,16,40,31, 8,27,32, 25,34, 39	
Вариант 5	Машина 6:	7,12,35,10,14,23,18, 13,4,20,37	
Вариант 6	Машина 1:	1,5,3,19,38,9, 11,24,33,26,17, 15,22,28, 25,34	
Вариант 6	Машина 4:	2,21,6,29,16,40,31, 8,27,32, 36, 39	
Вариант 6	Машина 6:	7,12,35,10,14,23,18, 13,4,20,37,30	
Вариант 7	Машина 1:	1,5,3,19,38,9, 11,24,33,26,17, 15,22,28, 25,34, 39	
Вариант 7	Машина 4:	2,21,6,29,16,40,31, 8,27,32, 36	
Вариант 7	Машина 6:	7,12,35,10,14,23,18, 13,4,20,37,30	
Вариант 8	Машина 1:	1,5,3,19,38,9, 11,24,33,26,17, 15,22,28,36	
Вариант 8	Машина 4:	2,21,6,29,16,40,31, 8,27,32, 25,34, 39	
Вариант 8	Машина 6:	7,12,35,10,14,23,18, 13,4,20,37,30	

Рис. 8.2 Результаты работы программы на листе 1

боты. Например, на машине 1 в первой группе первой выполняется просроченная работа 1. К этой же группе относятся работы 3 и 5 с одинаковой требуемой датой и имеющие одинаковую трудоемкость (рис. 8.1). Т.к., однако, заготовки для работы 3 поступают только ко второй половине рабочего дня, поэтому сначала выполняется работа 5.

Если работы требуются к моментам с одинаковым резервом в рабочих часах, но имеют различную трудоемкость, то система часто предлагает сначала выполнить работу с большей трудоемкостью. В частности, если требуемая дата выполнения одной работы от другой работы отличается на нерабочий день, то обе такие работы имеют одинаковый резерв рабочего времени.

На машине 4 в первой группе сначала выполняется срочная работа 2. Несмотря на то, что работа 21 должна быть выполнена в день 2, т.е. позже работы 6 со сроком выполнения день 1, система предлагает сначала выполнять работу 21. Причина такой ситуации состоит в том, что трудоемкость работы 21 составляет 2 часа, тогда как работа 6 длится 3 часа.

По окончании расчета на лист выводятся номера вариантов, рекомендуемые в соответствии с методами Сэвиджа и Гурвица. Кроме того, для всех не доминируемых вариантов выводятся данные о значениях критериев  $U, \bar{V}$  (рис. 8.3), а также значения основных показателей расписания: коэффициента плановой загрузки  $Kw$ , коэффициента неравномерности загрузки  $Kn$ , коэффициентов группирования  $Kg$  и запаздывания  $Kz$ , полной длительности выполнения расписания  $Stax$ , среднего  $Tc$  и наибольшего  $Tmax$  запаздываний. Величина коэффициента плановой загрузки вычисляется по формуле 2.8, коэффициент неравномерности загрузки определяется по формуле 2.7, коэффициент группирования по формуле 2.1, коэффициент запаздывания – формулой 2.3.

Коэффициент плановой загрузки: 0,8	
Рекомендуемые варианты: по методу Сэвиджа - вариант 5, по методу Гурвица - вариант 5	
Показатели вариантов расписания:	
относительные затраты на наладку набора работ $U$ ; средняя полезность заказов $V$ ;	
коэффициент неравномерности загрузки $Kn$ ; коэффициент группирования $Kg$ ; коэффициент запаздывания $Kz$ ;	
полная длительность выполнения $Stax$ , среднее $Tc$ и наибольшее $Tmax$ запаздывания в календарных часах	
Начальные значения критериев: $U = 0$ ; $V = 0,249$	
Вариант 1:	$U = 39,225$ ; $V = 1,175$ ; $Kn = 1,6$ ; $Kg = 4$ ; $Kz = 0,15$ ; $Stax = 105$ ; $Tc = 3,4$ ; $Tmax = 61$
Вариант 2:	$U = 38,975$ ; $V = 1,174$ ; $Kn = 1,5$ ; $Kg = 4$ ; $Kz = 0,15$ ; $Stax = 105$ ; $Tc = 3,4$ ; $Tmax = 61$
Вариант 3:	$U = 38,475$ ; $V = 1,119$ ; $Kn = 1,8$ ; $Kg = 4$ ; $Kz = 0,18$ ; $Stax = 110$ ; $Tc = 3,8$ ; $Tmax = 61$
Вариант 4:	$U = 38,275$ ; $V = 1,107$ ; $Kn = 1,4$ ; $Kg = 5$ ; $Kz = 0,18$ ; $Stax = 106$ ; $Tc = 4,4$ ; $Tmax = 61$
Вариант 5:	$U = 37,025$ ; $V = 0,959$ ; $Kn = 1,6$ ; $Kg = 5$ ; $Kz = 0,15$ ; $Stax = 93$ ; $Tc = 4,2$ ; $Tmax = 61$
Вариант 6:	$U = 36,8$ ; $V = 0,652$ ; $Kn = 1,9$ ; $Kg = 5$ ; $Kz = 0,15$ ; $Stax = 109$ ; $Tc = 4,9$ ; $Tmax = 61$
Вариант 7:	$U = 36,55$ ; $V = 0,652$ ; $Kn = 1,7$ ; $Kg = 5$ ; $Kz = 0,15$ ; $Stax = 109$ ; $Tc = 4,9$ ; $Tmax = 61$
Вариант 8:	$U = 35,15$ ; $V = 0,587$ ; $Kn = 2$ ; $Kg = 5,71$ ; $Kz = 0,15$ ; $Stax = 109$ ; $Tc = 4,9$ ; $Tmax = 61$
Вариант 9:	$U = 36,15$ ; $V = 0,498$ ; $Kn = 1,6$ ; $Kg = 5,71$ ; $Kz = 0,2$ ; $Stax = 104$ ; $Tc = 5,5$ ; $Tmax = 60,5$
Вариант 10:	$U = 34,65$ ; $V = 0,483$ ; $Kn = 2$ ; $Kg = 6,67$ ; $Kz = 0,2$ ; $Stax = 108$ ; $Tc = 6,2$ ; $Tmax = 60,5$

Рис. 8.3 Значения показателей расписания для различных вариантов

### 8.2.3 Анализ результатов планирования

Необходимость такого анализа может возникнуть, прежде всего, в случаях, когда в результате расчетов по методам Сэвиджа и Гурвица предлагаются разные варианты плана. Кроме того, расчеты по этим методам могут и не дать результата, который удовлетворит пользователя. В общем случае, при значительной загрузке – с  $Kw = 0,9$  и более, имеет смысл выбирать вариант с большим коэффициентом группирования  $Kg$ . При малой загрузке целесообразно использовать вариант с высокой полезностью  $\bar{V}$ .

При параллельной работе нескольких машин часто существенно важно обеспечить примерно одинаковую загрузку всех включенных машин. В этом случае обычно уменьшается общее время выполнения *Ст<sub>ах</sub>*, коэффициент запаздывания *K<sub>з</sub>*, определяющий количество запаздывающих работ, и среднее время запаздывания *T<sub>с</sub>*. В данном примере имеет смысл в качестве рабочего принять вариант 2, имеющий относительно более высокие показатели расписания. На рис. 8.4 показано расписание для этого варианта.

В данном случае для выполнения на машине 1 работы 1, имеющей вид 1, в момент начала рабочего дня, равного 8 часов, необходима переналадка с начального вида 2, на которую установлена норма 0,5 час. Соответственно, работа 1 начинается в 8,5 часов и заканчивается в 10,5 часов. После этого последовательно, без переналадки, выполняется работа 5, которая начинается в 10,5 часов и заканчивается в 11,5 часов. После этого на машине имеет место перерыв из-за отсутствия заготовок для работы 3

После поступления в 12 часов заготовок для работы 3, эта работа может быть выполнена, после чего без переналадок выполняются работы 19, 38 и 9. Работы 9 и 19 требуются к окончанию второго дня, а работа 38 требуется к окончанию четвертого дня, но эти работы имеют различную трудоемкость. Наибольшая трудоемкость у работы 9 и составляет 3 часа, наименьшая у работы 38 и равна одному часу. Работа 19 имеет трудоемкость 2 часа. В результате система планирует сначала выполнить работу 19, затем короткую работу 38 и только после этого работу 9 с большой трудоемкостью.

Во второй группе работ на машине 1 после переналадки на вид 3, в соответствии с той же логикой, выполняются 11, 24, 33, 26 и 17. В этой группе самая большая трудоемкость у работы 17. Затем машина 1 переналаживается на вид 6 и выполняет работы 15 и 22. Наконец, после переналадки на вид 5 выполняются работы 20, 30 и затем работа 25 вида 2. Программа также создает соответствующие последовательности работ для машин 4 и 6.

Система обеспечивает вывод расписания работы машин в виде диаграммы Ганта (рис. 8.5).

В нижней части рис. 8.5 помещена сама диаграмма, представляющая собой график загрузки машины во времени в рабочих часах (без учета необходимых календарных перерывов). Отсчет рабочего времени на диаграмме производится от момента начала первого рабочего дня.

В верхней части помещается т.н. «легенда», в которой каждый вид работ описывается соответствующим цветом. Программа предусматривает легенду из 12 возможных цветов (видов работы), фактически в данном примере используются 6 видов работ (верхний ряд легенды). Из диаграммы наглядно видно, как происходит группирование, например, работы первого вида закрашены лимонным цветом, при этом часть работ первого вида выполняется на машине 1, а часть на машине 4. Выполнение работ вида 3 (темносинего цвета) полностью закреплено за машиной 6, работы вида 4 (черного цвета) – за машиной 1. Работы вида 2 (коричневого цвета) поделены между машинами 4 и 6, а работы вида 5 (кофейного цвета) запланированы частично на машине 6 и частично на машине 1.

Диаграмма Ганта хорошо иллюстрирует влияние трудоемкости работ на последовательность их выполнения. Горизонтальный размер прямоугольника, описывающего каждую работу, соответствует длительности ее непосредственного выполнения.

План обработки по варианту 2 в календарных часах

Машина 1: 8,5 (1) 10,5; 10,5 (5) 11,5; 12 (3) 13; 13 (19) 14; 14 (38) 15; 15 (9) 16; 19 (11) 20; 20 (24) 21; 21 (33) 22; 32 (26) 33; 33 (17) 35; 36 (15) 37; 37 (22) 40; 41 (20) 43; 43 (30) 46; 80 (25) 82; 83 (39) 85;  
 Машина 4: 8 (2) 11; 11 (21) 13; 13 (6) 16; 16 (29) 18; 18 (16) 21; 21 (40) 33; 33 (31) 36; 37 (8) 40; 40 (27) 44; 44 (32) 47; 47,5 (20) 82,5; 82,5 (36) 86,5;  
 Машина 6: 9 (7) 12; 12 (12) 15; 15 (35) 18; 18 (10) 22; 22 (14) 34; 34 (23) 38; 38 (18) 42; 44 (13) 48; 80 (4) 85; 85 (37) 89; 90 (34) 105;

Рис. 8.4 План обработки

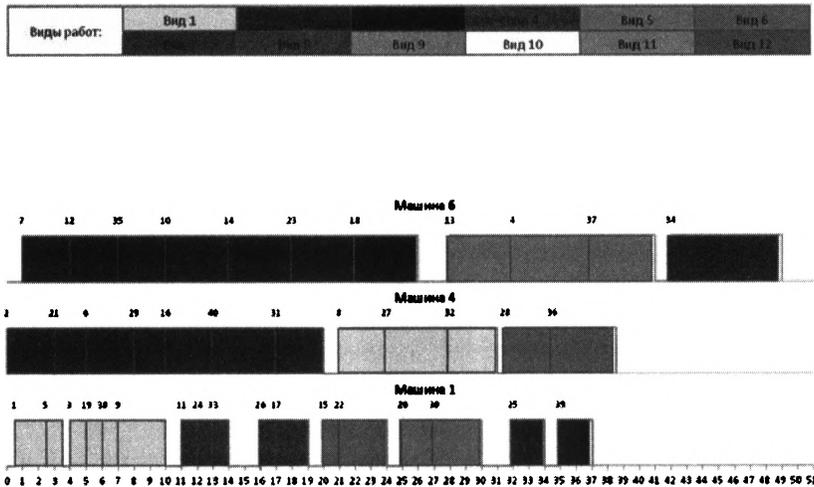


Рис. 8.5 Диаграмма Ганта

Для оценки характера расположения работ внутри групп необходимо учесть, что в данной задаче требуемые моменты выполнения работ не конкретизированы с точностью до часа, а заданы на момент окончания некоторого календарного дня. Поскольку трудоемкость каждой работы составляет всего несколько часов, в результате имеется целый ряд работ с заданной одинаковой датой выполнения.

В таких условиях на последовательность выполнения работ в одной группе влияют 2 фактора. Первый фактор заключается в зависимости требуемого момента запуска каждой работы  $q_i$  от ее трудоемкости  $p_i$  (формула 3.28). Согласно этой формуле, при одинаковой дате выполнения, работа с большей трудоемкостью должна начинаться раньше, чем работа с меньшей трудоемкостью.

С другой стороны, согласно выражению 3.18, величина полезности каждого следующего узла с увеличением трудоемкости  $p_i$  входящей ветви оказывается меньше, чем для узла с работой меньшей трудоемкости. Поэтому работы с меньшей трудоемкостью должны начинаться раньше.

Вернемся к рассмотрению первой группы работ на машине 1. Из рис. 8.5 следует, что группа состоит из примерно одинаковых работ 5, 3, 19, 38 малой продолжительности, несколько большей работы 1 и самой большой работой группы 9. Между работами 5 и 3 имеется небольшой зазор, вызванный поздним поступлением заготовок для работы 3.

В данном случае, вследствие небольшой разницы в требуемой дате выполнения, система рекомендует выполнять сначала работы с меньшей трудоемкостью, т.е. имеет место преобладание второго фактора, что приводит к понижению суммарной длительности производственного цикла. Кроме того, система стремится в начале первого планового дня включить в расписание работы того вида, для которого машина была настроена ранее.

Рассмотрим, например, случай, когда в исходном задании (рис. 8.1) все весовые коэффициенты равны 1 (рис. 8.6).

Как следует из рис. 8.6, на первой машине система рекомендует сначала выполнить работу 21, и только после этого выполнять работу 1, которая уже просрочена (рис. 8.1). Причина

Недоминируемые варианты	
Вариант 1 Машина 1:	21, 1,3,5,19,38, 17,24,33,11,26, 15,28,22, 13,20,30, 34
Вариант 1 Машина 4:	2,6,29,40,16,31, 8,9,32, 25, 37
Вариант 1 Машина 6:	7,35,12,10,14,18,23,39, 27, 4, 36
Вариант 2 Машина 1:	21, 1,3,5,19,38, 17,24,33,11,26, 15,28,22, 13,20,30,37
Вариант 2 Машина 4:	2,6,29,40,16,31, 8,9,32, 25,34
Вариант 2 Машина 6:	7,35,12,10,14,18,23,39, 27, 4, 36

**Рис. 8.6** Фрагмент недоминируемых вариантов при единичных весовых коэффициентах

такого положения, во-первых, состоит в том, что работа 21 весьма небольшая (всего 1 час), а во-вторых, это работа того же вида 2, на который машина 1 настроена к началу рабочего дня.

Если считать, что работа 1 является весьма срочной, то для соответствующего изменения расписания необходимо этой работе придать существенный весовой коэффициент, например, 4. Уже отмечалось в п. 5.2, весовой коэффициент работы отличается от часто используемого коэффициента приоритета, который непосредственно устанавливает очередность работы. С увеличением весового коэффициента по сравнению с единицей, программа не обязательно уменьшает срок выполнения соответствующей работы, а старается выполнить эту работу в точно установленный срок, т.е. при наличии резерва времени срок выполнения может даже повышаться. В тех случаях, когда такой срок уже пройден, весовой коэффициент превращается в коэффициент приоритета. В данном случае, срок выполнения работы 1 уже отрицательный и установка весовой коэффициент приведет к появлению работы на первом месте в расписании.

Необходимо отметить, что увеличение весовых коэффициентов сказывается не только на той работе, для которой коэффициент вводится. Причина этого явления состоит в том, что при построении дерева решений система оценивает полезность заказов не только на его текущем уровне, но и по всему объему заказов. В целом, установка увеличенных весовых коэффициентов для работ с просроченным сроком выполнения, зачастую способствует упорядочению всех работ в расписании. В частности, по этой причине на рис. 8.1 для работы 2 принят весовой коэффициент 3.

### 8.2.4 Листинг основной части программы

Аналогично программам для одиночных машин, на каждом уровне построения дерева расписания используются 6 основных массивов: *UStage()*, *VStage()*, *ParStage()*, *CompStage()*, *NPStage()* и *Tk()*, в которых записываются параметры всех узлов этого уровня. При применении нескольких параллельных машин приходится использовать дополнительный массив *FStage()*, в котором записываются фиктивные длительности полезности узлов на текущем уровне, которые равны максимальному значению времени выполнения расписания в узлах текущего уровня.

Соответственно, к массивам *U()*, *V()*, *Par()*, *Comp()*, *NP()* и *Commen()*, которые используются для дальнейшего построения ветвей дерева путем перезаписи значений параметров недоминируемых узлов, необходимо добавить массив *FComp()*. В этот массив записываются фиктивные длительности полезности в узлах предыдущего уровня. Необходимость в этих массивах диктуется использованием формулы 3.26 для расчета полезности в узлах, моменты выполнения которых происходят раньше, чем в предыдущих уровнях.

Программа автоматически переносит данные с листа в переменные и массивы. В качестве примера на рис. 8.7 приведен фрагмент программы, позволяющий заполнить трехмерный массив норм на переналадку  $s$ .

Согласно программе на рис. 8.7, величина нормы на переналадку зависит от порядка перехода от одного вида работ к другому, причем эта зависимость может изменяться от машины к машине. Аналогично, в зависимости от используемой машины может меняться и величина операционной трудоемкости каждой работы  $p$ . Если отдельная работа по каким-то причинам не может быть выполнена на конкретной машине, то в качестве величины трудоемкости используется значение -1.

На рис. 8.8 показан расчет средней трудоемкости каждой работы  $pav$  для парка включенных машин. Момент требуемого начала работы  $qs$  определяется по сроку выполнения в рабочих часах и средней трудоемкости работы.

```

NVID = Cells(2, "N").Value 'Количество видов работ'
NMach = Cells(2, "M").Value 'Количество машин'
...
UpperLeft2 = Cells(1, "M").Value 'Имя первой ячейки стоимости переналадок
LowerRight2 = Cells(1, "L").Value 'Имя последней ячейки стоимости переналадок
Kappa = Range(UpperLeft2, LowerRight2).Columns.Count
Kappa = Kappa / NMach 'количество колонок для одной машин
If Kappa <> NVID Then
MsgBox "Ошибка в таблице переналадок"
Exit Sub
End If
ReDim s(NVID, Kappa, NMach) 'трудоемкость наладок - трехмерный массив'
For k = 1 To NMach
For j = 1 To Kappa 'наполнение массива переналадок'
Alfa = Range(UpperLeft2, LowerRight2).Row
Gamma = Range(UpperLeft2, LowerRight2).Column + j - 1 + (k - 1) * NVID
For i = 1 To NVID
s(i, j, k) = Cells(Alfa, Gamma).Value
Alfa = Alfa + 1
Next i
Next j
Next k
    
```

Рис. 8.7 Фрагмент программы для ввода таблицы переналадок

```

n = 0
pav(i) = 0
For j = 1 To NMach
If MetkaM(j) = 1 And p(i, j) > 0 Then 'для включенных машин и возможных работ'
pav(i) = pav(i) + p(i, j)
n = n + 1
End If
Next j
If n > 0 Then
pav(i) = pav(i) / n 'средняя трудоемкость каждой работы на машинах'
qs(i) = dd(i) - pav(i) 'требуемое начало в рабочих часах
Else 'если на включенных машинах выполнение работы невозможно'
MsgBox "В списке есть работа, которая не может быть выполнена ни на одной из включенных машин"
Exit Sub
End If
    
```

Рис. 8.8 Фрагмент расчета средней трудоемкости и требуемого начала работы

На рис. 8.9 приведен фрагмент программы ввода данных о состоянии парка машин. Для каждой машины записываются данные о цене работы и простоя за один час, метка включения, начальная настройка на вид работы и ожидаемый момент освобождения.

Момент освобождения машины в первый день планирования  $K_0$  может быть позже начала рабочего дня (совпадать с началом) или раньше этого начала. В последнем случае, следует установить, является ли график работы круглосуточным. Если это действительно так, то планирование на новый день для текущей машины должно начинаться с указанного момента освобождения. В противном случае, планирование начинается с момента начала рабочего дня.

Для расчета загрузки определяется полный резерв времени всех заказов в рабочих часах аналогично п. 5.6. Полный фонд времени  $Fond$  по всем работам на горизонте планирования устанавливается по строке с наибольшим резервом времени в рабочих часах. Затем по строкам работ накапливается трудоемкость набора работ  $Wip$ . Коэффициент загрузки  $KWip$  определяется как частное от деления полной трудоемкости на фонд времени с учетом имеющегося количества включенных машин (формула 2.8).

После подготовки исходных массивов рассчитываются значения исходных значений критериев в корне дерева. Величина относительных затрат в корне  $U_0 = 0$ , функция полезности заказов  $\bar{V}_0$  определяется с помощью функций  $Napr2()$  и  $Napr1()$ . Расчет основных параметров узлов первого уровня по всему количеству заказов производится в двойном цикле: внешний цикл осуществляется по работам, а внутренний цикл – по включенным машинам. В целом расчет аналогичен программе на рис. 5.18. Отсечение узлов по критериям и перенос в полные массивы недоминируемых узлов дерева решений производится полностью аналогично двойному циклу на рис. 5.19 и программе на рис. 5.20.

На последующих уровнях построения дерева решений все этапы программы первого уровня повторяются с некоторыми изменениями. Параметры ограничения вариантов по длительности устанавливаются аналогично рис. 5.21, параметров узла ветвления определяются аналогично

```
UpperLeft4 = Cells(1, "V").Value 'Имя первой ячейки машин
LowerRight4 = Cells(1, "W").Value 'Имя последней ячейки машин
Alfa = Range(UpperLeft4, LowerRight4).Row + 2
NMachW = 0
For j = 1 To NMach
    Gamma = Range(UpperLeft4, LowerRight4).Column + j - 1
    CostW(j) = Cells(Alfa, Gamma).Value 'стоимость часа простоя машины
    CostP(j) = Cells(Alfa + 1, Gamma).Value 'стоимость часа работы машины
    MetkaM(j) = Cells(Alfa + 2, Gamma).Value 'метка включения машины
    If MetkaM(j) > 1 Then
        MsgBox "Неправильная отметка работы машины"
        Exit Sub
    End If
    NMachW = NMachW + MetkaM(j) 'количество работающих машин'
    Vid0(j) = Cells(Alfa + 3, Gamma).Value 'начальный вид работы машины
    K0(j) = Cells(Alfa + 4, Gamma).Value 'ожидаемый момент освобождения машины
    If Vid0(j) > 0 And K0(j) < Tn And E(1) < 24 Then
        'если настройка отлична от нуля и момент освобождения меньше начала работы
        Resp = MsgBox("Работа круглосуточная?", vbYesNo + vbDefaultButton2)
        If Resp = vbNo Then 'работа не круглосуточная
            K0(j) = Tn 'момент освобождения устанавливается на начало работы
        End If
    End If
Next j
```

Рис. 8.9 Фрагмент программы для ввода данных о машинах

рис. 5.22. Отличие в организации параметров узла ветвления состоит в необходимости запоминания номера машины в узле *intMz* и фиктивной расчетной длительности в узле *engCz*.

Цикл по исходящим узлам предыдущего уровня производится по всем работам, а для каждой работы по всем включенным машинам. Этот внутренний цикл показан на рис. 8.10.

В начале цикла определяется момент *Tk* начала выполнения работы на машине и момент ее планового окончания *CompStage* в календарных часах. Относительная стоимость затрат *UStage* зависит от текущей наладки машины *PMach*.

Если окончание работы в новой ветви происходит позже, чем в узле-источнике, полезность определяется по формуле 3.20, в противном случае – по формуле 3.26. В последнем случае запоминается т.н. фиктивная длительность ветви *FStage*, равная длительности ветви предыдущего уровня; в первом случае фиктивная длительность совпадает с реальной. Отсечение узлов по критериям проводится в соответствии с правилами, описанными в п.п. 3.4.1, 3.4.2 и 3.4.3. Оставшиеся ветви имеют метку *MetCurStage(j) = 0*.

После окончания построения дерева решений определяется область расположения вариантов решения на листе и производится сортировка вариантов по убыванию массива *V()* критерия полезности. Для полученного набора вариантов проводится поиск наиболее целесообразного

```

For j = 1 To NMach 'цикл по машинам'
If MetCur(j) = 1 And p(i, j) > 0 Then 'для включенной машины и возможной работы'
n = n + 1 'порядковый номер ветви для разветвленного узла на текущем уровне'
Pr = 0 'начальное значение простоя'
If PMach(j) = 0 Then 'работа на машине первая'
Tk(n) = Calend(Cl(j), s(Vid(i), Vid0(j), j), j, 1)
Else
Tk(n) = Calend(Cl(j), s(Vid(i), Vid(PMach(j)), j), j, 1) 'момент начала новой работы'
End If
Esos = Tk(n)
If r(i) > Tk(n) Then
Pr = r(i) - Tk(n) 'время простоя'
Tk(n) = Arrival(r(i)) 'начало работы в момент ее поступления на машину'
End If
CompStage(n) = Calend(Tk(n), p(i, j), j, 2) 'момент окончания работы в календарных часах'
If CompStage(n) = 0 Then 'если не определен момент окончания работы'
MsgBox "недостаточен рабочий горизонт "
Exit Sub
End If
If PMach(j) = 0 Then 'начальное состояние машины'
UStage(n) = U(TreeStage(intZ)) + Uzak(i, 0, j, Vid0(j)) + Pr * CostP(j) / c + CostW(j) * p(i, j) / c
Else
UStage(n) = U(TreeStage(intZ)) + Uzak(i, PMach(j), j, 0) + Pr * CostP(j) / c + CostW(j) * p(i, j) / c
'относительные затраты в узле (перекаладка, стоимость простоя и работы)
End If
engVr = Vzak(Beta, i, j, Cl(j), Tk(n), CompStage(n)) 'полезность массива невыполненных работ в текущем узле'
If j = intMz Or engCz <= CompStage(n) Then 'машина в новой ветви та же, что в узле:'
' или окончание работы в узле раньше, чем в новой ветви'
VStage(n) = (engVz * Cl(j) + engVr) / CompStage(n) 'полезность ранее выполненных работ в узле
' окончание работы в узле позже, чем в новой ветви; машин разное'
FStage(n) = CompStage(n) 'фиктивная длительность совпадает с реальной'
Else
VStage(n) = engVz + engVr / CompStage(n)
'полезность новой ветви (невыполненных и выполненной работ) в узле'
FStage(n) = engCz 'фиктивная длительность ветви (совпадает с предыдущей ветвью)'
End If
ParStage(n) = TreeStage(intZ) 'Номер родительского узла'
MPStage(n) = i 'номер строки работы в узле'
MachStage(n) = j 'номер машины в узле'
End If
Next j

```

Рис. 8.10 Фрагмент расчета параметров создаваемого узла на уровнях после первого

варианта методами Сэвиджа и Гурвица, а также рассчитываются его основные показатели: коэффициенты неравномерности загрузки  $K_n$ , коэффициенты группирования  $K_g$  и запаздывания  $K_z$ , полной длительности выполнения расписания  $C_{max}$ , среднего  $T_c$  и наибольшего  $T_{max}$  запаздываний. На рис. 8.11 приведен фрагмент программы, позволяющий определить длительности выполнения расписания  $C_{max}$  и коэффициент неравномерности загрузки  $K_n$ .

Как видно из рис. 8.11, для каждого варианта восстанавливается вся цепочка узлов дерева. Время выполнения наиболее позднего узла (по всем машинам) является длительностью выполнения варианта  $C_d$ . На каждой машине накапливается трудоемкость  $F_{Stage}$  всех запланированных для нее работ. Затем определяются значения наибольшей  $maxU$  и наименьшей  $minU$  загрузки в рабочих часах. Коэффициент неравномерности загрузки определяется по отношению наибольшего и наименьшего значений.

```

For i = 1 To n                                'цикл по всем вариантам'
  ReDim FStage(MMach)                        'массив занятого времени на машине '
  k = TreeStage(VarNumber(i)) 'последний узел варианта'
  Cd(i) = Comp(k) 'Момент выполнения последнего узла варианта'
  l = 0
  Do Until k = 0 'по всем узлам варианта
    l = l + 1
    Tk(l) = Comp(k) 'момент начала выполнения узла
    CompStage(l) = Comp(k) 'момент начала выполнения узла
    If CompStage(l) > Cd(i) Then
      Cd(i) = CompStage(l) 'Момент окончания работы варианта'
    End If
    NPStage(l) = NP(k) 'строка работ в узле
    MachStage(l) = Mach(k) 'номер машины в узле
    k = Par(k) 'цикл до начала дерева поиска'
  Loop
  ...
  For l = 1 To BetaV 'наполнение строк работ на каждой машине для текущего варианта'
    ...
    FStage(MachStage(l)) = FStage(MachStage(l)) + p(NPStage(l), MachStage(l))
    ' накопление трудоемкости на машине
  Next l
  ...
  maxU = Application.Max(FStage()) 'для машин с наибольшей загрузкой
  minU = maxU
  For l = 1 To MMach
    If MetkaM(l) = 1 Then 'для включенных машин
      If FStage(l) < minU Then 'поиск минимально загруженной машины
        minU = FStage(l) 'для включенной машины с наименьшей загрузкой
      End If
    End If
  Next l
  If minU > 0 Then
    Kn(i) = Round(maxU / minU, 1) 'коэффициент неравномерности загрузки
  Else
    Kn(i) = 0
  End If
  ...
Next i

```

Рис. 8.11 Фрагмент определения длительности и коэффициента неравномерности загрузки для каждого варианта

### 8.2.5 Перепланирование расписания

В настоящем параграфе рассмотрим составление расписания при любом изменении начальной даты планирования, что возможно как при появлении нового календарного задания, так и при необходимости выполнения срочной работы. Рассмотрим пример перепланирования задания, первоначально имеющего вид, приведенный на листе 1 в книге MBook4.xls.

Как было указано в п. 8.2.1. задание на 15.09.16 8:00 состоит из 40 работ шести видов. В случае, показанном на календарном графике, в течение первого и второго рабочего дня планируются две 8-часовые рабочие смены. Следующий календарный день выходной, после которого опять планируется двухсменная работа. Выбранный план обработки показан выше на рис. 8.4.

Поскольку продолжительность первого рабочего дня в данном случае составляет 16 часов, при работе в точном соответствии с расписанием, в течение дня (до момента 24 часа) на первой машине должны быть полностью выполнены работы 1, 5, 3, 19, 38, 9, 11, 24, 33. В это же время, на машине 4 выполняются работы 2, 21, 6, 29, 16 и начинается работа 40; на машине 6 выполняются работы 7, 12, 35, 10 и начата работа 14. Положим, что к моменту окончания первого рабочего дня появилась срочная работа 41 вида 3 с требованием немедленного выполнения и, конечно, обеспеченная заготовками. В такой ситуации требуется перепланирование расписания, начиная со следующего рабочего дня.

Для корректировки расписания скопируем лист 1 на лист 2, очистим этот лист от результатов предыдущего расчета и введем данные о выполнении. Кроме того, в конце исходной таблицы запишем строку нового задания (рис. 8.12).

Обозначение (№ работы)	Требуемый календарный день готовности после начала	Ожидаемый календарный день поступления	Вид работы	Весовой коэффициент	Отметка выполнения	Трудоемкость в норма-часах					
						Машина 1	Машина 2	Машина 3	Машина 4	Машина 5	Машина 6
						1	2	3	4	5	6
1	-1	0	1	4	100	2	3	3	3	4	4
2	0	0	2	3	100	2	3	3	3	4	4
3	1	0,5	1	1	100	1	2	2	-1	3	3
4	1	0	5	1	0	-1	4	4	4	5	5
5	1	0	1	1	100	1	2	1	1	3	3
6	1	1	2	1	100	2	-1	-1	3	4	4
7	1	0	3	1	100	1	2	2	2	3	3
8	2	1	1	1	0	-1	3	3	3	-1	-1
9	2	0	1	1	100	3	4	4	4	5	5
10	2	0	3	1	100	1	3	3	3	4	4
11	2	0	4	1	100	1	3	3	3	4	4
12	2	1	3	1	100	-1	-1	2	2	3	3
13	2	0	5	1	0	3	4	4	4	4	4
14	2	0	3	1	50	2	3	3	3	4	4
38	4	0	1	1	100	1	2	2	2	3	3
39	4	0	3	1	0	2	3	3	3	4	4
40	4	0	2	1	70	3	4	4	4	5	5
41	1	1	3	3	0	2	3	3	3	4	4

Рис. 8.12 Фрагмент выполнения планового задания к окончанию первого рабочего дня

Для подготовки нового расписания в таблице состояния машин необходимо указать дату этого нового состояния. Кроме того, для каждой машины необходимо указать вид настройки в начале дня и ожидаемый момент освобождения. В данном случае на машине 1 последней выполнялась работа 33 вида 4, и к моменту начала нового рабочего дня в 8 часов машина 1 была свободной; машины 4 и 6 в 8 часов заняты работами 40 и 14 (обе работы вида 3).

Положим, что эти работы при перепланировании могут быть прерваны. В таком случае в таблицу исходных данных заносятся их проценты выполнения (70 и 50 соответственно), а моменты освобождения машин 4 и 6 считаются совпадающими с 8 часами.

Для проведения подготовки к перепланированию необходимо сдвинуть календарный график на единицу влево. После этого, можно указать на использование режима перепланирования и ввести данные о дате перепланирования и границах пересчета исходного задания (аналогично, например, п. 5.7). После пересчета строки законченных работ автоматически удаляются, а даты уменьшаются на одни сутки.

После подготовки к перепланированию, следует провести новый расчет расписания. В данном случае работа 4 оказывается просроченной, и для нее целесообразно ввести высокий весовой коэффициент, например 5.

При вводе данных обязательно необходимо откорректировать границы исходных работ. В данном примере система предлагает 10 не доминируемых вариантов, из которых можно выбрать, например, вариант 7, рекомендуемый методами Гурвица и Сэвиджа. Результат расчета иллюстрируется графиком Ганта (рис. 8.13).

Из диаграммы Ганта следует, что новая срочная работа 41 вида 3 запланирована на машине 6, которая к моменту освобождения уже настроена на этот вид работы. Работа 4 вида 5, которая серьезно просрочена, запланирована непосредственно после переналадки машины 4 на этот вид работ. Необходимо отметить, что работа 4 не включена в график более производительной машины 1, т.к. это исключается по техническим возможностям (в соответствующей графе для работы 4 стоит число -1). Это же относится и к работе 8, также выполняемой с опозданием.

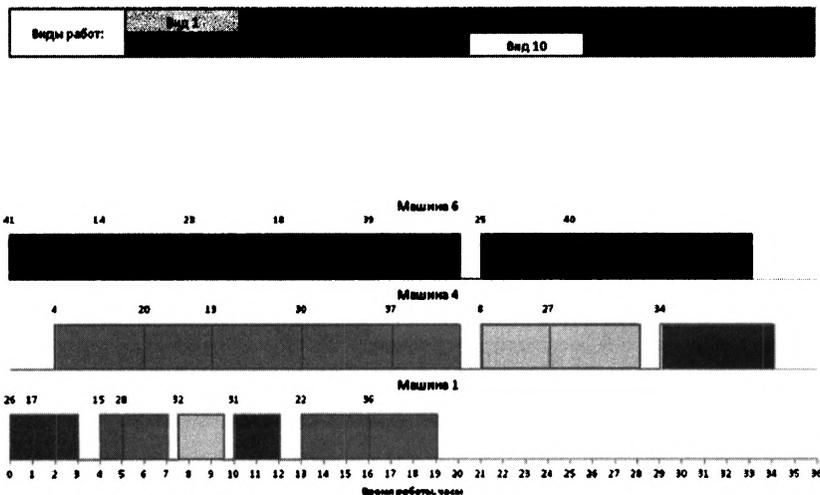


Рис. 8.13 Диаграмма Ганта для откорректированного расписания

В данном случае в первой группе работ на машине 1 рекомендуется сначала выполнить работу 26 с трудоемкостью в 1 час, и только после этого выполнить работу 17 с трудоемкостью в 2 часа.

Сравним откорректированный план по состоянию на 16.09.16 с остатком плана, составленного в предыдущий день (рис. 8.14)

Как видно из рис. 8.14, необходимость выполнения новой работы 41, а также введение высокого весового коэффициента на работу 4, существенно повлияли на распределение загрузки на всех работах. Прежде всего, работы 41 и 4 оказались на первом месте для машин 6 и 4. Ряд изменений произошел и на машине 1. В частности, работы 20 и 30 был переброшены на машину 4, был изменен порядок выполнения работы 22 (рис. 8.13).

Все работы вида 5 (кофейного цвета), к которой, в частности, принадлежит работа 4, сконцентрировались на машине 4, а оставшиеся работы вида 6 (красные) перенесены на машину 1. Оставшиеся работы вида 1 (лимонные) распределены между разными машинами, что, в первую очередь, связано с технической невозможностью выполнения работы 8 на машине 1.

### 8.2.6 Моделирование расписания

На листе 3 приведен пример для моделирования расписаний, содержащий 60 работ для четырех включенных машин. Расчет этого пример приводит к семи недоминируемым вариантам, из которых выбран вариант 4, рекомендуемый методом Сэвиджа (рис. 8.15). Составленное расписание достаточно удовлетворительно распределяет работы группами на всех включенных машинах.

На следующем листе представлены варианты расчетов расписаний при различных значениях ограничителей ветвления. На первом шаге моделирования установлены значения  $B1 = 64$ ,  $B2 = 2$  и  $B3 = 0,05$ , которые применялись на листе 3. В этом случае количество вариантов равно 7, а длительность решения составляет 17 сек.

При увеличении значений ограничений  $B1$ ,  $B2$  и уменьшении  $B3$  пучок возможных ветвей дерева расширяется, что приводит к большому значению количества узлов на каждом уровне построения дерева. При  $B1 = 64$ ,  $B2 = 3$  и  $B3 = 0,03$  длительность решения составляет 57 сек. С уменьшением  $B1$  до величины 25 количество вариантов падает до 9, а длительность решения составляет 24 сек. При увеличении коэффициента  $B3$  до значения 0,05 без изменения  $B1$  и  $B2$  пучок решений становится излишне узким и многие ценные варианты решений теряются.

Качество решения при различных значениях ограничителей можно оценить также по значению коэффициента запаздывания  $Kz$ . Из всех вариантов проведенного моделирования, только в случае с  $B1 = 25$ ,  $B2 = 3$  и  $B3 = 0,03$  можно использовать решения с коэффициентом  $Kz$ , равным 0,1. Во всех других случаях этот коэффициент заметно больше.

План обработки на 16.09	
Вариант 2 Машина 1:	26,17, 15,28, 32, 31, 22,36
Вариант 2 Машина 4:	4,20,13,30,37, 8,27, 34
Вариант 2 Машина 6:	41,14,23,18,39, 25,40
Остаток плана обработки на 15.09	
Вариант 2 Машина 1:	26,17, 15,22, 20,30, 25, 39
Вариант 2 Машина 4:	40,31, 8,27,32, 28,36
Вариант 2 Машина 6:	14,23,18, 13,4,37, 34

Рис. 8.14 Сравнение откорректированного плана с его предшественником

Изменение психологического коэффициента может приводить к перераспределению загрузки работ по машинам. Снижение психологического коэффициента ниже значения 0,1 несколько ухудшает показатели расписания: повышаются коэффициенты неравномерности загрузки и коэффициент запаздывания, снижается коэффициент группирования. Повышение психологического коэффициента до значения 0,15 может уменьшить  $Kz$  до 0,08, правда за счет увеличения коэффициента неравномерности загрузки.

На рис. 8.16 показана зависимость коэффициента загрузки от планового горизонта. Очевидно, что загрузка участка из четырех машин невелика и не превышает 0,7.

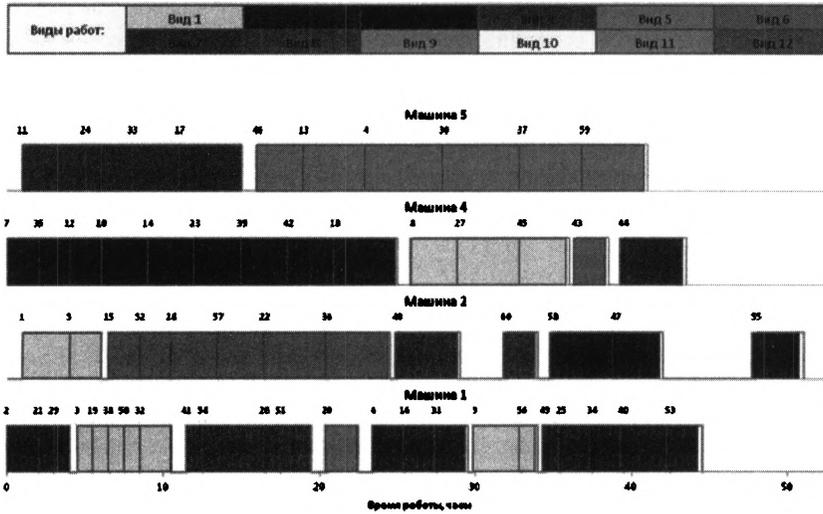


Рис. 8.15 Диаграмма Ганта для четырех машин и 60 работ шести видов

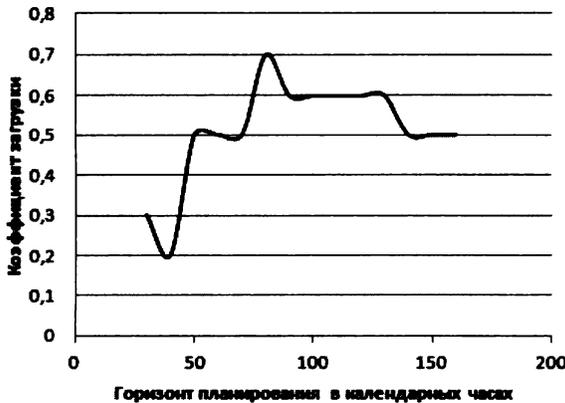


Рис. 8.16 График зависимости загрузки от горизонта планирования

Для изучения влияния горизонта планирования на качество расписания выбран вариант с психологическим коэффициентом, равным 0,1 и значениями  $B1 = 25$ ,  $B2 = 3$  и  $B3 = 0,03$ . На рис. 8.17 приведены последовательности загрузки всех четырех машин при различных горизонтах планирования. Проанализируем полученные результаты.

При любом горизонте на каждой машине автоматически организуются группы работ. Состав этих групп достаточно устойчив в начальной части расписания. С увеличением горизонта перераспределения работ между машинами обычно не происходит, а имеет место добавка дополнительных работ. При увеличении горизонта работы с малой трудоемкостью часто выполняются раньше работ с большей трудоемкостью, иногда даже в том случае, если требуемая дата выполнения последних раньше.

На рис. 8.18 приведены графики изменения показателей расписания в зависимости от планового горизонта.

Из рассмотрения графиков на рис. 8.18 следует, что большинство показателей с ростом горизонта после 50 часов колеблются относительно некоторых постоянных значений. Причина такого поведения заключается, прежде всего, в том, что участок сильно недогружен – коэффициент загрузки равен 0,5. Однако при увеличении горизонта после 140 часов быстро растет показатель неравномерности загрузки машин (кривая 3), а также коэффициент запаздывания (кривая 5). Поэтому значение горизонта, равное 140 календарных часов, следует считать критическим.

Н, часы	Машина 1	Машина 2
30	2	1.5,3
40	2	1.5,3
50	2,21, 19,3, 15, 6,16	1.5,8,9, 22
60	2,21, 19,3, 15, 6,16	1.5,8,9, 22
70	2,21, 19,3, 15, 6,16	1.5,8,9, 22
80	2,6,21,29, 19,32, 16, 26, 20,13	1.5,3, 15,26,22, 31
90	2,6,21,29, 19,32, 16, 26, 20,13	1.5,3, 15,26,22, 31
100	2,6,21,29, 19,38,32, 11,26, 20, 16,31,40, 27, 25,34	1.5,3, 15,26,22,36, 30,37
110	2,6,21,29, 19,38,32, 11,26, 20, 16,31,40, 27, 25,34	1.5,3, 15,26,22,36, 30,37
120	2,21, 3,19,38,50, 29,6,16, 32, 31, 9,27, 30,37, 45	1.5, 15,52,28, 17,26, 46,20,4, 49,25,53,44, 47
130	2,21, 3,19,38,50, 29,6,16, 32, 31, 9,27, 30,37, 45	1.5, 15,52,28, 17,26, 46,20,4, 49,25,53,44, 47
140	2,21, 3,19,38,50, 29,6,16, 32, 31, 9,27, 30,37, 45	1.5, 15,52,28, 17,26, 46,20,4, 49,25,53,44, 47
150	2,21, 3,19,38,50, 29,6,16, 32, 31, 9,27, 30,37	1.5, 15,52,28, 17,26, 46,20,4, 49,25,34,53, 58
160	2,21, 3,19,38,50, 29,6,16, 32, 31, 9,27, 30,37	1.5, 15,52,28, 17,26, 46,20,4, 49,25,34,53, 58

Н, часы	Машина 4	Машина 5
30	6	4
40	6	4
50	7,10,12,14,23,18	11,17, 20,13,4
60	7,12,10,14,23,18	11,17, 20,13,4
70	7,12,10,14,23,18	11,17, 20,13,4
80	7,12,10,14,23,18, 8,9,27, 25	24,33,11,17, 4,30
90	7,12,10,14,23,18, 8,9,27, 25	24,33,11,17, 4,30
100	7,35,12,10,14,23,39,42,18, 8	24,33,41,17, 13,4, 9, 43
110	7,35,12,10,14,23,39,42,18, 8	24,33,41,17, 13,4, 9, 43
120	7,35,12,10,14,23,39,42,18, 8, 22,43	24,33,41,11,54,51,48, 13, 34,40, 36
130	7,35,12,10,14,23,39,42,18, 8, 22,43	24,33,41,11,54,51,48, 13, 34,40, 36
140	7,35,12,10,14,23,39,42,18, 8, 22,43	24,33,41,11,54,51,48, 13, 34,40, 36
150	7,35,12,10,14,23,39,42,18, 8, 22,43,57, 60, 55	24,33,41,11,54,51,48, 13,59, 45,56, 36, 40,44, 47
160	7,35,12,10,14,23,39,42,18, 8, 22,43,57, 60, 55	24,33,41,11,54,51,48, 13,59, 45,56, 36, 40,44, 47

Рис. 8.17 Последовательности выполнения работ при различных горизонтах



**Рис. 8.18** Параметры расписаний для разных горизонтов: 1 – приведенные затраты переналадок за один рабочий день; 2 – полезность выполняемого набора работ; 3 – коэффициент неравномерности загрузки; 4 – коэффициент группирования; 5 – коэффициент запаздывания, умноженный на 5

### 8.3 Расписания для параллельных машин с работой «на склад»

При составлении расписания для производства «на склад» отдельные заказы потребителей не рассматриваются. В то же время это совершенно не означает, что их интересами можно пренебречь. При такой стратегии необходимо обеспечить, по возможности, достаточный запас каждого выпускаемого продукта в течение всего периода производства. Такой запас должен обеспечить как удовлетворение предполагаемого среднего спроса, так и небольшие отклонения спроса от средних значений. Для последнего необходимо сохранять некоторый страховой запас.

Групповое расписание возможно также при планировании «на склад», которое характерно для процессного производства, изготовления метизов, инструментов общего назначения и т.д. В таком производстве, как правило, минимальное количество совместно изготавливаемого продукта составляет т.н. «техническую» партию. Последняя зависит от объема машины, размера упаковки, величины транзитной нормы и т.п. Экономичный размер заказа (EOQ), определяемый по известной формуле Уиллиса, также может быть использован в качестве технической (наименьшей) партии. С экономической точки зрения имеет смысл объединять технические партии каждого продукта в группы, которые можно выпускать без переналадки.

С точки зрения классификации расписаний, задача о параллельных машинах при производственной стратегии «на склад» и процессном типе производства имеет структурную формулу 8.2, отличающуюся от стратегии «под заказ» в формуле 8.1.

$$R|nmit, D_i, s_{ikl}|U, \bar{V}. \tag{8.2}$$

В формуле 8.2 задается суточный расход  $D_i$  каждого  $i$ -ого продукта, по которым вычисляются необходимые моменты выполнения каждой технической партии. Кроме того, процесс обработки технической партии не должен прерываться, на что указывает параметр  $nmit$ .

### 8.3.1 Исходные данные задачи

Исходные данные для составления расписания настоящей задачи записываются на листе MS Excel электронной книги MBook5.xls. Эта книга в состоянии поставки состоит из четырех листов, на которых иллюстрируются различные аспекты составления расписаний.

На листе 1 в табл.  $B\$6:AK\$13$  находятся технические данные и нормы времени на переналадку, фрагмент которых приведен на рис. 8.19. Как обычно, по столбцу изменяются продукты, с которых ведется переналадка, а по строке – продукты, на которые переналадка осуществляется. Если какой-либо продукт на соответствующей машине производиться не может, для него записывается значение нормы переналадки, равное -1.

В этой задаче полагается, что объем партии продукта зависит от конкретной машины, а время обработки продукта может зависеть как от возможностей машины, так и от вида продукта.

В табл.  $F\$16:K\$23$  записаны данные каждой из машин, причем одна из машин находится в отключенном состоянии. По каждой работающей машине приведены данные о ее настройке на конкретный вид работ на момент планирования (начало нового рабочего дня) и ожидаемый момент освобождения.

В табл.  $F\$26:K\$29$  описан календарный график работы машины по дням, начинающийся с первого дня выполнения составляемого расписания. Для каждой смены календарного дня проставлено количество рабочих часов. В приведенном примере предусмотрена двухсменная работа с 12-часовым рабочим днем.

В табл.  $Q\$16:V\$23$  приведены данные по текущим запасам каждого продукта по состоянию на момент планирования. Кроме того, указывается скорость расходования продукта, наличие задолженности по поставкам и необходимость в страховых запасах, а также момента поступления необходимого сырья.

Как указывалось в п. 2.3, под плановым периодом  $G$  понимается количество рабочих дней, по прошествии которых план регулярно пересчитывается. В данной задаче величина  $G$  при-

Технические данные и нормы времени в часах на переналадку для машины 1						
	Продукт 1	Продукт 2	Продукт 3	Продукт 4	Продукт 5	Продукт 6
Объем технической партии в литрах	2000	2000	2000	2000	2000	2000
Продолжительность технической партии в часах	2	2	2	3	3	2
Продукт 1	0	0,5	1	1,5	1	2
Продукт 2	0,5	0	1,5	1,5	1	1
Продукт 3	1,5	1	-1	2	2	2,5
Продукт 4	1	1,5	1	0	1	1
Продукт 5	1	2	2	1	0	1
Продукт 6	1	1	1,5	1	1,5	0

Рис. 8.19 Фрагмент технических данных и норм времени на наладку для машины 1

нята равной трем рабочим дням. Учитывая, что третий календарный день в графике является нерабочим, величина планового горизонта  $h$  выбрана равной четырем календарным дням.

Прежде всего, положим, что под работой при стратегии «на склад» будем понимать изготовление одной технической партии любого продукта на любой машине. Количество таких работ не задается как исходная величина, а определяется в процессе расчета. Более того, планируемое количество работ пересчитывается на каждом уровне построения расписания и полностью определяется только в конце расчета.

Будем также полагать, что расписание составляется не для определенного количества работ, как было выше в предыдущем параграфе, а для установленного горизонта планирования  $h$  в календарных днях. В таком случае для каждого  $i$ -ого продукта на начальный момент времени можно рассчитать необходимый объем  $p_0(i)$  его производства на горизонте:

$$p_0(i) = hD(i) - Z_0(i) - Z_1(i) + B(i) + Z_c(i), \quad (8.3)$$

где  $D(i)$  – ожидаемый спрос  $i$ -ого продукта в течение одного календарного дня;  $Z_0(i)$  – начальный запас;  $Z_1(i)$  – ожидаемые поступления;  $B(i)$  – задолженность по поставкам;  $Z_c(i)$  – нормативный страховой запас.

Обозначим объем технической партии  $i$ -ого продукта на  $j$ -ой машине через  $Y_{ij}$ , а продолжительность изготовления этой партии через  $F_{ij}$ . Поскольку заранее неизвестно, какой продукт и в каком количестве будет изготавливаться на конкретной машине, то будем полагать, что  $i$ -ый продукт изготавливается техническими партиями некоторой средней величины

$$\bar{Y}(i) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M Y_{ij}, \quad (8.4)$$

продолжительность которой равна

$$\bar{F}(i) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M F_{ij}. \quad (8.5)$$

В начале планирования необходимое количество технических партий каждого  $i$ -ого продукта

$$n_0(i) = \frac{p_0(i)}{\bar{Y}(i)}, \quad (8.6)$$

причем первая техническая партия должна быть изготовлена к моменту

$$d_i = \frac{E}{D(i)} [Z_0(i) + Z_1(i) - B(i) - Z_c(i)], \quad (8.7)$$

где  $E$  – количество рабочих часов в рабочем дне.

На каждом следующем  $k+1$ -ом этапе введения  $i$ -ого продукта в расписание, объем незапланированных работ уменьшается по сравнению с предыдущим  $k$ -ым этапом, который выполнялся на машине с номером  $j(k)$ , на величину одной технической партии  $Y_{i,j(k)}$  до значения

$$p_{k+1}(i) = p_k(i) - Y_{i,j(k)}. \quad (8.8)$$

При этом остающееся для дальнейшего планирования значение  $n_{k+1}$  определяется соответственно как

$$n_{k+1}(i) = \frac{p_{k+1}(i)}{\bar{Y}(i)}, \quad (8.9)$$

а последующая партия должна быть изготовлена к моменту

$$d_{k+1}(i) = d_k(i) + \frac{E}{D(i)} Y_{i,j(k)}. \quad (8.10)$$

Последовательное применение формул (8.8 – 8.10) для определения количества остающихся не запланированных работ и требуемых моментов их изготовления позволяет свести описываемую задачу к задаче, изложенной в предыдущем параграфе. Построение дерева поиска решения производится с помощью отсечения узлов по критериям, описанным в п.п. 3.4.1, 3.4.2 и 3.4.3.

На листе 2 приведен возможный вариант перепланирования этого задания, на листе 3 проводится моделирование по различным параметрам. На листе 4 приведен пример моделирования с целью нахождения рационального горизонта планирования.

### 8.3.2 Работа с программой

Для работы с программой планирования в MS Excel устанавливается соответствующий рабочий лист, например, лист 1 и осуществляется запуск макроса. При выборе опции «без моделирования», система сообщает о последней дате планирования и предлагает одну из двух возможностей – подготовку планирования с новой датой или повторение расчета с последней датой.

В форме «Ввод данных» задаются основные параметры процесса. Система автоматически рассчитывает загрузку участка (по включенным машинам) и выдает соответствующее сообщение. По окончании расчета все возможные и не доминируемые варианты выводятся на лист. На рис. 8.20 приведен фрагмент этих результатов как последовательность изготовления технических партий каждого вида для пяти включенных машин. Эта последовательность состоит из нескольких групп технических партий каждого продукта. Для каждой группы указывается обозначение продукта и, через дробь, количество последовательно выполняемых технических партий. Совокупность технических партий одного продукта назовем технологической партией.

Недоминируемые варианты	
Вариант 1	Машина 1: P3/16, P2/6, P1/5, R1/3
Вариант 1	Машина 2: Q1/5, Q2/1, P1/6, P3/4, R1/3
Вариант 1	Машина 3: P2/14, R1/6
Вариант 1	Машина 4: R1/3, Q2/4, P2/8, Q2/1
Вариант 1	Машина 6: Q1/4, R1/12
Вариант 2	Машина 1: P3/16, P2/6, P1/5, R1/4
Вариант 2	Машина 2: Q1/5, Q2/1, P1/6, P3/4, R1/3
Вариант 2	Машина 3: P2/14, R1/5
Вариант 2	Машина 4: R1/3, Q2/4, P2/8, Q2/1
Вариант 2	Машина 6: Q1/4, R1/13

Рис. 8.20 Фрагмент не доминируемых вариантов расчета

По окончании расчета на экран выводятся номера вариантов, рекомендуемые в соответствии с методами Сэвиджа и Гурвица. Кроме того, для всех не доминируемых вариантов выводятся данные о значениях критериев  $U, \bar{V}$ , а также значения основных показателей расписания: коэффициента плановой загрузки  $Kw$ , коэффициента неравномерности загрузки  $Kn$ , коэффициентов группирования  $Kg$  и запаздывания  $Kz$ , полной длительности выполнения расписания  $Stax$ , среднего  $Tc$  и наибольшего  $Tmax$  запаздываний.

### 8.3.3 Анализ результатов планирования

Необходимость такого анализа может возникнуть, прежде всего, в случаях, когда в результате расчетов по методам Сэвиджа и Гурвица предлагаются разные варианты плана. Качество предлагаемых вариантов можно оценить с помощью их показателей (рис 8.21).

При параллельной работе нескольких машин важно обеспечить примерно одинаковую загрузку всех включенных машин. В этом случае обычно уменьшается общее время выполнения  $Stax$ , коэффициент запаздывания  $Kz$ , определяющий количество запаздывающих работ, и среднее время запаздывания  $Tc$ . В данном примере имеет смысл в качестве рабочего принять вариант 1, имеющий наименьший коэффициент  $Kn$ .

На рис. 8.22 показано расписание для этого варианта. В плане приведены начало и окончание каждой технологической партии в календарных часах с учетом графика работы цеха. В скобках записываются сама выполняемая группа, содержащая обозначение продукта и количество технических партий, выполняемых без переналадки.

Система обеспечивает вывод расписания работы машин в рабочих часах в виде диаграммы Ганта (рис. 8.23). На поле каждого прямоугольника, окрашенного в цвет одного из продуктов (верхний ряд видов работ) записывается обозначение этого продукта. Сверху над полем указывается количество технических партий без переналадки.

Для выбранного варианта программа выводит на лист планы движения запасов во времени в процессе выполнения расписания (рис. 8.24). Числа без скобок представляют моменты поступления на склад вновь изготовленных партий продуктов. В скобках записывается имею-

Коэффициент плановой загрузки: 1
Рекомендуемые варианты: по методу Сэвиджа - вариант 4, по методу Гурвица - вариант 1
Показатели вариантов расписания:
относительные затраты на наладку набора работ $U$ ; средняя полезность заказов $V$ ; полная длительность выполнения $Stax$ в календарных часах;
коэффициент неравномерности загрузки $Kn$ ; коэффициент группирования $Kg$ ; коэффициент запаздывания $Kz$
Начальные значения критериев: $U = 0$ ; $V = 3,571$
Вариант 1: $U = 96,25$ ; $V = 2,282$ ; $Kn = 1,18$ ; $Kg = 8,42$ ; $Kz = 0,19$ ; $Stax = 106$
Вариант 2: $U = 97,25$ ; $V = 2,197$ ; $Kn = 1,21$ ; $Kg = 8,5$ ; $Kz = 0,2$ ; $Stax = 110$
Вариант 3: $U = 96,75$ ; $V = 2,197$ ; $Kn = 1,21$ ; $Kg = 8,5$ ; $Kz = 0,2$ ; $Stax = 110$
Вариант 4: $U = 96,75$ ; $V = 2,181$ ; $Kn = 1,31$ ; $Kg = 8,5$ ; $Kz = 0,2$ ; $Stax = 110$
Вариант 5: $U = 94,75$ ; $V = 2,099$ ; $Kn = 1,38$ ; $Kg = 8,5$ ; $Kz = 0,2$ ; $Stax = 114$

Рис. 8.21 Показатели качества недоминируемых вариантов

План обработки по варианту 1
Машина 1: 8 (P3/16) 40; 41 (P2/6) 86; 86,5 (P1/5) 96,5; 97,5 (R1/3) 106,5;
Машина 2: 10 (Q1/5) 25; 25,5 (Q2/1) 29,5; 30,5 (P1/6) 48,5; 81,5 (P3/4) 93,5; 94 (R1/3) 106;
Машина 3: 8 (P2/14) 50; 82 (R1/6) 106;
Машина 4: 8 (R1/3) 20; 20,5 (Q2/4) 36,5; 37,5 (P2/8) 93; 95 (Q2/1) 99;
Машина 6: 8 (Q1/4) 24; 25 (R1/12) 106;

Рис. 8.22 План обработки по варианту 1

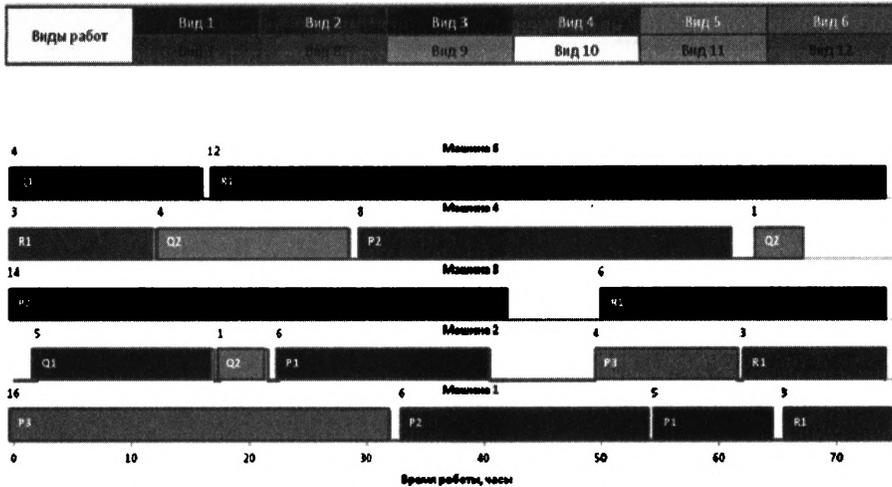


Рис. 8.23 Диаграмма Ганта для участка параллельных машин

шийся объем продукта до поступления, а затем, через дробь, объем после поступления. Если по продукту имеется задолженность, ее объем записывается через дробь после величины объема после поступления.

Например, по продукту P3 в начальный момент времени 8 часов имеется запас, равный 4 кубометра и задолженность, равная 0,4 кубометра. Изготовление этого продукта запланировано сначала на машине 1, где выпускаются 16 партий (рис. 8.23), а затем еще изготавливаются 4 партии на машине 2.

Работа участка в данном примере круглосуточная и первое поступление имеет место в календарный момент 10 часов (рис. 8.24). В дальнейшем поступление продукта постепенно нарастает и после шестнадцати партий в момент 40 часов достигает значения 22,8 кубометров. Затем запас расходуется до величины 4,3 кубометра и начинает пополняться в момент, равный 84,5 час. После выполнения четырех партий и достижения горизонта планирования, запас продукта P3 сохраняется в размере 2,2 кубометра.

Продукт P1:	8 (3)	33.5 (0/1.5/2.3)	36.5 (0/1.5/1.4)	39.5 (0/1.5/0.5)	42.5 (0.4/1.9)	45.5 (1.3/2.8)	48.5 (2.2/3.7)	68.5 (0/2/4.6)	90.5 (0/2/3)
		92.5 (0/2/1.4)	94.5 (0.2/2.2)	96.5 (1.8/3.8)	104 (2.2/2.2)				
Продукт P2:	8 (5/0.5)	11 (3/4.5)	14 (3/4.5)	17 (3/4.5)	20 (3/4.5)	23 (3/4.5)	26 (3/4.5)	29 (3/4.5)	32 (3/4.5)
		35 (3/4.5)	38 (3/4.5)	41 (3.2/4.7)	44 (4.4/5.9)	47 (4.9/6.9)	50 (6.6/8.1)	54 (7.8/9.3)	58 (8.8/10.8)
		62 (10/11.5)	65 (11.2/13.2)	68 (13.2/14.7)	71 (13.7/15.7)	74 (15.4/16.9)	77 (16.6/18.1)	80 (18.2/2.3)	84 (2.3/4.3)
		86 (3.3/5.3)	87 (4.8/6.3)	90 (4.8/6.3)	93 (4.8/6.3)	104 (0.7/0.7)			
Продукт Q1:	8 (0.3)	12 (0/1/0.3)	13 (0.6/2.1)	16 (1.7/3.2)	16 (3.2/4.2)	19 (3.8/5.3)	20 (5.2/6.2)	22 (5.9/7.4)	24 (7.1/8.1)
		25 (8/5.5)	104 (0/0/1.4)						
Продукт R1:	8 (6/1)	12 (3.3/4.8)	16 (3.1/4.6)	20 (2.9/4.4)	29 (0.7/1.7)	33 (0/1)	37 (0/1/0.7)	41 (0/1/1.4)	45 (0/1/2.1)
		49 (0/1/2.8)	66 (0/1.5/17.8)	90 (0/1.5/16.4)	90 (0/1/14.9)	94 (0/1.5/15.6)	94 (0/1/14.1)	98 (0/1.5/14.8)	98 (0/1.5/13.3)
		98 (0/1/11.8)	100.5 (0/2/11.8)	102 (0/1.5/10.4)	102 (0/1.5/8.9)	102 (0/1/7.4)	103.5 (0/2/7)	104 (0/0/5.2)	
Продукт Q2:	8 (0.5)	24.5 (0/1.5/1.1)	28.5 (0/1.5)	29.5 (1.4/2.9)	32.5 (2.6/4.1)	36.5 (3.7/5.2)	99 (0/1.5/1.1)	104 (0/0/0.1)	
Продукт P3:	8 (4/0.4)	10 (2.8/4.8)	12 (4/5)	14 (5.2/7.2)	16 (6.4/8.4)	18 (7.6/9.6)	20 (8.8/10.8)	22 (10/12)	24 (11.2/13.2)
		26 (13.6/15.6)	30 (14.8/16.8)	32 (16/18)	34 (17.2/19.2)	36 (18.4/20.4)	38 (19.6/21.6)	40 (20.8/22.8)	84.5 (4.3/5.8)
		87.5 (4.6/6.1)	90.5 (4.8/6.3)	93.5 (5.1/6.6)	104 (2.2/2.2)				

Рис. 8.24 Движение запасов в процессе выполнения расписания

Аналогичное движение запасов имеет место и по остальным продуктам. Программа позволяет просмотреть графики изменения запасов во времени в процессе выполнения расписания (рис. 8.25). На этом рисунке положительные значения на графиках соответствуют запасам продуктов, а отрицательные – значениям задолженностей. На графиках видны зигзагообразные участки поступления запасов, т.е. производства, и участки, на которых графики описываются прямыми линиями, наклон которых определяется только скоростью расходования продукта. Интервал времени, в течение которого по всем продуктам имеет место только расходование, относится к нерабочим дням.

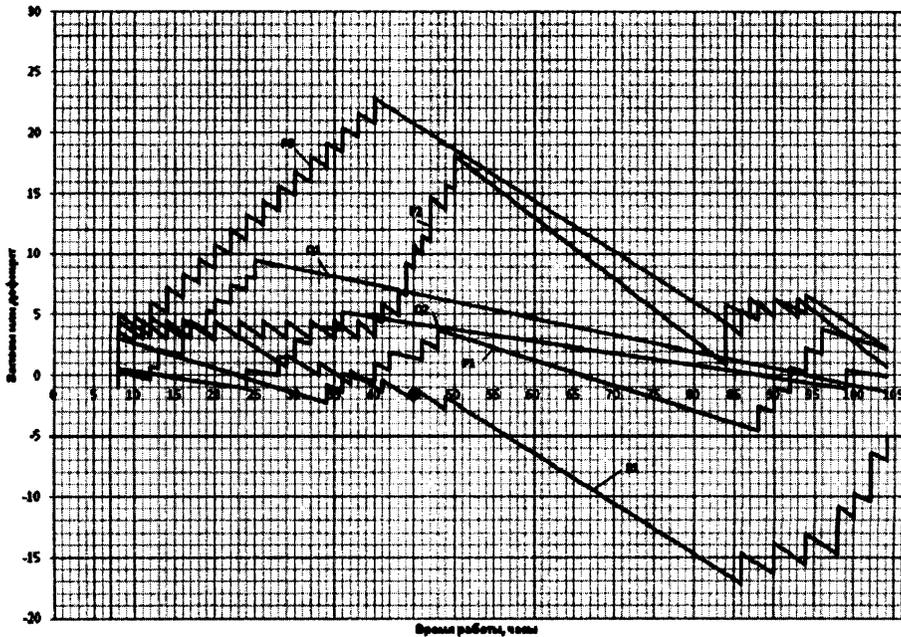


Рис. 8.25 Графики движения запасов и дефицита продуктов

### 8.3.4 Листинг основной части программы

На каждом уровне построения дерева расписания используются те же основные массивы, что и в предыдущей задаче 8.2.4:  $UStage()$ ,  $VStage()$ ,  $ParStage()$ ,  $CompStage()$ ,  $NPStage()$ ,  $Tk()$  и  $FStage()$ . В данном случае, однако, заранее неизвестно количество узлов построения дерева. Более того, для разных вариантов решения такое количество может быть разным. Поэтому здесь необходимо использовать дополнительный массив  $LastNode()$ , в котором записываются номера последних узлов для каждой ветви решений.

При вводе исходных данных программа автоматически переносит данные с листа в переменные и массивы аналогично п. 8.2.4. Параллельно с нормами переналадки, вводятся массивы  $Vol$  объемов технических партий и  $Pbat$  для их продолжительностей.

Остановимся на вводе данных о начальных запасах продуктов (рис. 8.26).

На рис. 8.26 показан расчет потребности  $r$  по каждому продукту на горизонте планирования и введен массив  $Work$  текущих значений остающихся потребностей.

```

NHor = Cells(2, "Y").Value 'Горизонт планирования в календарных днях'
...
For i = 1 To NMid 'цикл по количеству видов продуктов
Vid(i) = Cells(Alfa, Gamma + i - 1).Value 'Обозначение продукта
Stock0(i) = Cells(Alfa + 1, Gamma + i - 1).Value 'Складской запас сырья на момент планирования
Back(i) = Cells(Alfa + 2, Gamma + i - 1).Value 'Задолженность по продукту
Cons(i) = Cells(Alfa + 3, Gamma + i - 1).Value 'Плановый расход в литрах/календарный день
Save(i) = Cells(Alfa + 4, Gamma + i - 1).Value 'Страховой запас продукта в литрах
r(i) = Cells(Alfa + 5, Gamma + i - 1).Value 'Календарный день готовности сырья
If r(i) = Int(r(i)) Then 'если срок задан в полных календарных днях
r(i) = (r(i) - 1) * 24 + Tn 'срок поступления в часах равен моменту начала работы '
If r(i) < 0 Then 'для отрицательных значений
r(i) = 0
End If
Else 'при более точном задании момента поступления
r(i) = r(i) * 24
End If
p(i) = Cons(i) * NHor - Stock0(i) - Stock1(i) + Back(i) + Save(i) 'потребность на горизонте планирования
Work(i) = p(i) 'в начале текущая оставшаяся потребность равна полной '
Next i
    
```

Рис. 8.26 Фрагмент программы ввода начальных запасов

В начале расчета программа по каждому продукту определяет количество необходимых технических партий на горизонте планирования (рис. 8.27). Для этого устанавливается средний возможный объем партии  $pav$  и средняя возможная продолжительность обработки  $pavs$ . Затем по значениям потребностей  $Work$  рассчитываются величины среднего количества партий  $Batch$  по каждому продукту. Момент первой потребности в продукте  $d$  возникает тогда, когда исчерпывается имеющийся запас.

Кроме среднего числа партий определяется также наибольшее возможное количество партий  $intWork$  для всех продуктов на плановом горизонте, а также величина загрузки участка  $Wip$ .

На рис. 8.28 приведен фрагмент определения параметров узлов первого уровня. Программа включает внешний цикл  $i$  по видам работ и внутренний цикл  $j$  по списку машин. Для каждого узла устанавливается возможный момент начала ее выполнения  $T_k$ . На первом уровне этот момент, прежде всего, определяется временем освобождения машины и длительностью ее переналадки. После этого момент начала выполнения с помощью функции  $Commence()$  проверяется на возможность выполнения в течение текущего или последующего рабочего дня.

Отсечение узлов по критериям производится в соответствии с правилами, описанными в п.п. 3.4.1, 3.4.2 и 3.4.3. Оставшиеся ветви на первом уровне имеют метку  $MetCurStage = 0$ . Оставшиеся ветви пересчитываются и переносятся в массивы недоминируемых узлов дерева решений.

На уровнях выше первого в каждом узле  $intZ$  текущего уровня просматривается вся цепочка предыдущих уровней с тем, чтобы для каждого продукта  $NP$  рассчитать момент  $d$  израсходования новой партии на следующем уровне (рис. 8.29). Затем подсчитывается количество оставшихся партий  $Batch$  по каждому продукту и необходимый момент начала изготовления очередной партии  $gs$  (рис. 8.30). Если по всем продуктам выполнены все требуемые партии, программа останавливается по соответствующему флагу.

На последующих уровнях построения дерева решений все этапы программы первого уровня повторяются с учетом параметров ограничения вариантов по длительности согласно п. 3.4.4. Механизм этих ограничений подробно описан в главе 5 (рис. 5.21 и 5.22). Отсечение узлов по критериям производится аналогично отсечению на первом уровне. Для полученного набора вариантов проводится поиск наиболее целесообразного варианта методами Сэвиджа и Гурвица, а также рассчитываются его основные показатели.

```

Wip = 0 'начальное значение загрузки'
intWork = 0
For i = 1 To NProd 'по продуктам
  n = 0 'расчет необходимого среднего количества партий'
  pav(i) = 0
  pavs(i) = 0
  For k = 1 To NMach 'по машинам
    If MetMach(k) > 0 And s(i, i, k) = 0 Then
      'если машина включена и продукт можно обрабатывать на этой машине'
      n = n + 1 'количество пригодных машин для продукта
      If n = 1 Then
        sngDur = Vol(i, k) 'размер партии для первой машины
      Else
        If Vol(i, k) < sngDur Then
          sngDur = Vol(i, k) 'наименьший размер партии для всех машин'
        End If
      End If
      pav(i) = pav(i) + Vol(i, k) 'суммарный объем на всех машинах
      pavs(i) = pavs(i) + Fbat(i, k) 'суммарная продолжительность на всех машинах
    End If
  Next k
  If n > 0 Then
    pav(i) = pav(i) / n 'средний объем партии'
    Betch(i) = Round(Work(i) / pav(i), 0) 'начальное усредненное количество партий'
    pavs(i) = pavs(i) / n 'средняя продолжительность обработки'
    d(i) = (Stock0(i) + Stock1(i) - Save(i) / Cons(i) / 24
    'момент израсходования имеющегося запаса в календарных часах
    If d(i) > 0 Then 'если резерв времени положительный
      dd(i) = WorkHours(d(i)) 'количество рабочих часов в заданном сроке
    Else
      dd(i) = 0 'срок выполнения равен 0
    End If
    qs(i) = dd(i) - pavs(i) 'средний требуемый момент начала'
    intWork = intWork + Int(p(i) / sngDur) + 1 'наибольшее возможное количество партий на горизонте'
  Else
    'если на включенных машинах выполнение работы невозможно'
    MsgBox " В списке есть работа, которая не может быть выполнена ни на одной из включенных машин "
    Exit Sub
  End If
  aJ(i) = 1 'метка невыполненной работы'
  Wip = Wip + p(i) / pav(i) * pavs(i) 'загрузка'
  If Cells(1, "Y").Value = 1 And d(i) <= HGot Then
    'если при моделировании срок выполнения работы в календарных часах меньше горизонта планирования
    Tr = Wip 'накопленная трудоемкость на горизонте планирования
  End If
Next i

```

Рис. 8.27 Расчет необходимого числа партий каждого продукта

```

n = 0
For i = 1 To NVid 'по всем видам продуктов
aJ(i) = 0.5 'строится узел первого уровня с i-ой выполняемой работой '
For j = 1 To NMach 'по всем машинам
If MetkaM(j) = 1 And s(i, i, j) = 0 Then 'для включенных машин и возможных работ'
n = n + 1 'номер текущего узла первого уровня'
UStage(n) = UZak(1, 0, j, Vid0(j)) + CostW(j) * Fbat(1, j) / 'трудоемкость
ParStage(n) = 0 'родительский узел
NPStage(n) = 1 'номер продукта
Tk(n) = K0(j) + s(i, Vid0(j), j) 'возможное начало
If r(i) > Tk(n) Then 'учет времени поступления материала
Tk(n) = r(i) 'возможный момент начала работы машины в календарных часах
End If
Ekes = Tk(n)
Tk(n) = Commence(Tk(n), Fbat(1, j), j)
'возможный момент начала работы машин в календарных часах с учетом нерабочего времени
If Tk(n) = 0 And Ekes > 0 Then
MsgBox "Превышается длительность календаря"
Exit Sub
End If
CompStage(n) = Tk(n) + Fbat(1, j) 'окончание технической партии
VStage(n) = (V0 * K0(j) + VZak(NVid, 1, j, K0(j), Tk(n), CompStage(n))) / CompStage(n)
'полезность всех возможных партий продуктов
MachStage(n) = j 'номер машин
End If
Next j
aJ(i) = 1 'возврат метки работы на невыполнение'
Next i

```

Рис. 8.28 Определение параметров узлов первого уровня

```

For intZ = 1 To intN 'цикл по узлам разветвления на уровне'
sngVz = V(TreeStage(intZ)) 'расчетная полезность в созданном узле '
intMz = Mach(TreeStage(intZ)) 'машина, работающая в узле'
sngCz = FComp(intZ) 'фиктивная расчетная длительность в узле
For i = 1 To NVid 'по продуктам
Work(i) = p(i) 'начальные значения объема работ'
d(i) = (Stock0(i) + Stock1(i) - Back(i) - Save(i)) / Cons(i) * 24
'момент израсходования имеющегося запаса в календарных часах
Next i
k = TreeStage(intZ) 'номер последнего узла '
Do Until k = 0
intPer = NP(k) 'продукт в узле'
Work(intPer) = Work(intPer) - Vol(intPer, Mach(k))
'остаточный объем работ по продукту в узле'
If Work(intPer) < 0 Then
Work(intPer) = 0
End If
d(intPer) = d(intPer) + Vol(intPer, Mach(k)) / Cons(intPer) * 24
'момент израсходования очередной партии в календарных часах
If d(intPer) > 0 Then
dd(intPer) = WorkHours(d(intPer))
'момент израсходования очередной партии в рабочих часах
Else
dd(intPer) = 0
End If
k = Par(k) 'переход по цепочке'
Loop
...
Next intZ

```

Рис. 8.29 Определение моментов израсходования очередных партий

```

For i = 1 To Nvid 'по продуктам
  aJ(i) = 1 'начальная установка меток работ на невыполнение'
  Batch(i) = Round(Work(i) / раv(i), 0) 'оставшееся количество партий продукта
  qs(i) = dd(i) - раvс(i) 'необходимый момент начала партии
Next i
Flag = 1 'установка флага на окончание цикла партий
For i = 1 To Nvid 'по всем продуктам
  If Batch(i) > 0 Then 'если хоть по одному продукту нужны новые партии
    Flag = 0 'флаг продолжения цикла
    i = Nvid 'окончание цикла проверок необходимости новых партий
  End If
Next i

```

Рис. 8.30 Фрагмент расчета недостающего количества партий

### 8.3.5 Перепланирование расписания

В настоящем параграфе рассмотрим составление расписания при любом изменении начальной даты планирования. Положим, что причиной перепланирования явилась необходимость изменения скорости расходования продукта Q2 с 2,4 до 4 кубометров/сутки. Рассмотрим пример перепланирования задания, первоначально имеющего вид, приведенный на листе 1 в книге MBook5.xls.

Для корректировки расписания скопируем лист 1 на лист 2 и очистим этот лист от результатов предыдущего расчета. Запуская макрос на листе 2, выберем режим «Подготовка к перепланированию» и введем дату нового расчета.

Для подготовки нового расписания в таблице состояния машин необходимо указать дату этого нового состояния. Кроме того, для каждой машины необходимо указать вид настройки на момент начала следующего дня и ожидаемый момент освобождения (после начала рабочего дня). Эти данные следуют из рис. 8.22 и рис. 8.24. Рассмотрим, например, состояние машины 1 к 8 часам следующего рабочего дня (рис. 8.31).

План обработки по варианту 1	
Машина 1:	8 (P3/16) 40; 41 (P2/6) 86; 86,5 (P1/5) 96,5; 97,5 (R1/3) 106,5;

Рис. 8.31 Фрагмент плана, составленного на листе 1

Из рис. 8.31 следует, что в момент 32 часа (8 часов следующего дня) на машине 1 должна выполняться очередная партия продукта P3, который в соответствии с таблицей запасов имеет номер 6. Длительность каждой партии обработки продукта 2 на машине 1 согласно таблице норм составляет 2 часа. Поэтому в момент 32 часа (или в 8 часов следующего дня) должна быть закончена двенадцатая техническая партия. На рис. 8.32 приведен фрагмент движения запасов продукта P3 в течение первого рабочего дня.

Кроме состояния всех машин, на листе 2 необходимо ввести изменения в таблицу запасов. В данном примере, в момент начала рабочего дня (32 часа старого расписания) запас продукта P3 составляет 16 кубометров, а задолженность полностью отсутствует.

После ввода состояния машин и запасов программа может быть запущена в обычном режиме, т.е. без подготовки к перепланированию. В данном случае программа предлагает 14 недоминируемых вариантов, из которых выберем, например, вариант 1.

Продукт P3: 8 (4/0,4) 10 (2,8/4,8) 12 (4/6) 14 (5,2/7,2) 16 (6,4/8,4) 18 (7,6/9,6) 20 (8,8/10,8)  
 22 (10/12) 24 (11,2/13,2) 26 (12,4/14,4) 28 (13,6/15,6) 30 (14,8/16,8) 32 (16/18)

Рис. 8.32 Фрагмент движения продукта P3 в течение первого дня

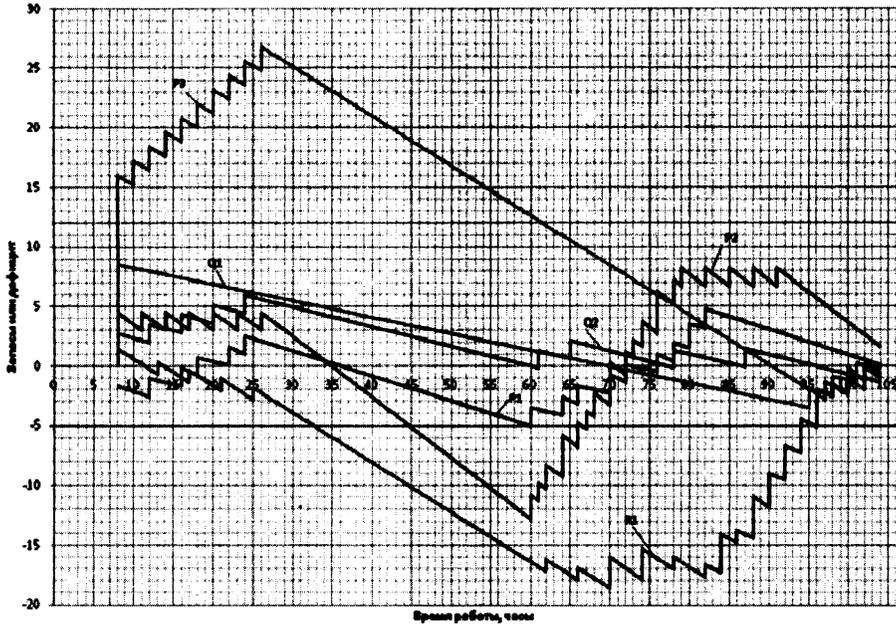


Рис. 8.33 Движение запасов после перепланирования

Сравним характер нового плана с предыдущим на рис. 8.25. Очевидно, сдвиг расчета на сутки не очень сильно повлиял на последовательность выполнения партий каждого продукта. Последовательное использование описываемого метода обязательно приводит к уменьшению так складских запасов, так и дефицитов по всем выпускаемым продуктам.

### 8.3.6 Моделирование расписания

На листе 3 приведен пример для моделирования расписаний путем изменения параметров ограничений  $B1$ ,  $B2$ ,  $B3$  и психологического коэффициента  $\alpha$ . Величина  $B1$  выбиралась равной 64, 25 или 16,  $B2$  – равной 3 или 2,5,  $B3$  – 0,01 или 0,02,  $\alpha$  – равному 0,1, 0,05 или 0,15.

При большом значении  $B1$  количество вариантов составило 38, а длительность выполнения программы – 50 сек. При меньших значениях  $B1$  количество вариантов не превышало 13, а длительность составляла менее 40 сек.

Наибольший интерес представило сочетание параметров  $B1=16$ ,  $B2=2,5$ ,  $B3=0,01$  и  $\alpha=0,1$ . В этом случае программа предложила 13 недоминируемых вариантов, длительность расчета составила 37 сек. В отличие от других сочетаний параметров моделирования, в этом случае программа предусматривает варианты с коэффициентом неравномерности загрузки  $Kn=1,13$  и

коэффициентом запаздывания  $Kz=0,23$ , что существенно меньше, чем при других вариантах моделирования.

На листе 4 представлен пример моделирования расписаний при различных плановых горизонтах в пределах от 2 до 6 календарных дней. При горизонте свыше трех загрузка системы остается примерно одинаковой и составляет около 0,9. На рис. 8.34 показаны графики изменения показателей расписания.



**Рис. 8.34** Параметры расписаний для разных горизонтов: 1 – приведенные затраты переналадок за один рабочий день; 2 – полезность выполняемого набора работ; 3 – коэффициент неравномерности загрузки; 4 – коэффициент группирования; 5 – коэффициент запаздывания, умноженный на 10

Как видно из рис. 8.34, приведенные затраты за один рабочий день, а также коэффициент неравномерности загрузки, при различных горизонтах остаются примерно одинаковыми. Полезность с ростом горизонта несколько возрастает. Коэффициент запаздывания с ростом горизонта постепенно увеличивается, причем его резкий рост происходит при горизонте больше 5, что явно связано с таким же ростом коэффициента группирования. Поэтому имеет смысл полагать, что в данном случае горизонт планирования не должен превышать пяти календарных дней.

#### 8.4 Расписания для параллельных машин с переналаживаемым формоизменяющим инструментом

Рассмотрим задачу составления расписания для нескольких не одинаковых параллельных машин при последовательном выполнении работ с различными формоизменяющими инструментами. Таким инструментом может быть штамп, прессформа, экструзионная головка, фильерная доска и т.п. При составлении расписания учитывается как необходимость своевременного завершения каждой работы с заданным сроком выполнения  $d_i$ , так и экономия затрат на переналадку машины.

Согласно известной структурной формулы теории расписаний, поставленная задача может быть записана как

$$R|d_i, r_{jl}, s_{jk}|U, \bar{V}, \quad (8.11)$$

где  $R$  – любое возможное количество не одинаковых параллельных машин;  $d_i$  – заданный срок выполнения работ  $i$ ; срок  $r_{jl}$  прибытия материалов  $l$  для изготовления деталей  $j$ ;  $s_{jk}$  – трудоемкость установки инструмента для изготовления деталей  $j$  на машину  $k$ ;  $U$  – относительные затраты для выполнения всех работ;  $\bar{V}$  – средняя полезность заказов за время выполнения расписания.

#### 8.4.1 Исходные данные задачи

Исходные данные для составления расписания настоящей задачи записываются на листе MS Excel электронной книги MBook6.xls. Эта книга в состоянии поставки состоит из двух листов, на которых иллюстрируются различные аспекты составления расписаний.

На листе 1 в табл. \$A\$4:\$F\$34 находится задание, состоящее из тридцати работ шестнадцати различных видов (деталей). В каждой строке задания описываются параметры работ: номер работы; требуемый момент день готовности; вид работы; количество в штуках; весовой коэффициент работы и выполнение работы в процентах. Моменты готовности работ, как обычно, отсчитываются от момента наступления календарного дня, являющегося первым в расписании. Для каждой из деталей приведено время выполнения изготовления детали на соответствующей машине в секундах (табл. \$L\$5:\$P\$20). Если работа на какой-то из машин не может быть выполнена, в соответствующей графе записывается значение 0. Целесообразно записывать работы в порядке возрастания требуемых дат их выполнения.

В табл. \$\$5:\$T\$21 сопоставлены номера деталей и номера соответствующих возможных прессформ. В частности для изготовления деталей 9 возможно применение прессформ с номерами 8 и 9. В данном случае детали изготавливаются из пластмасс, и поэтому износ прессформ может не учитываться. При использовании более твердых материалов следует вести учет текущего износа инструментов аналогично п. 7.2.

В табл. \$W\$5:\$Y\$45 приведены нормы расхода различных материалов для деталей каждого вида в кг на одну деталь. Нормы времени в часах на установку прессформ для каждой из пяти машин записаны в табл. \$AA\$5:\$AG\$20. Если прессформа не может быть установлена на машине, в таблице записывается значение 0.

В табл. \$AE\$26:\$AI\$33 записаны данные каждой из машин. По каждой работающей машине приведены данные о выполняемом заказе (работе) и о номере прессформы, установленной на машине на момент планирования (начало нового рабочего дня). Кроме того, указывается плановый процент выполнения заказа в партии и ожидаемый процент выполнения партии на момент планирования. Очевидно, что три работы приведенного примера (5, 7 и 17), уже начаты и по ним следует указать отметки выполнения работ.

Так же, как и в предыдущих задачах, будем полагать, что, если в графе «Выполнение» будет указана величина 100%, то при дальнейшем планировании начатая на машине работа будет беспрепятственно продолжаться до вплоть до ее окончания. В противном случае, работа, в принципе, можно быть прервана для выполнения другой, более срочной работы.

В данном случае положим, что работа 17 выполняется до величины 100%, а планирование работ 5 и 7 может зависеть от производственной ситуации. Поэтому для работы 5, которая выполняется на машине 2 партией в 100%, в графу «Выполнение» заносится величина 20%, а для работы 7, выполняемой на машине 5 партией в 50 процентов, эта величина также равна 20%.

В табл. \$AE\$41:\$BC\$51 описан календарный график работы машины по дням, начинающийся с первого дня выполнения составляемого расписания. Для каждой смены календарного дня проставлено количество рабочих часов, для каждой машины указано плановое время проведения технического обслуживания. В приведенном примере предусмотрена двухсменная работа

с двенадцатичасовым рабочим днем. Кроме того, указано плановое количество операторов в каждой смене.

В приведенном примере полагается, что плановый период составляет 5 рабочих дней, а плановый горизонт совпадает с полным набором имеющихся работ.

График ежедневного поступления сырья в тоннах приведен в табл. 8.30. Всего в данном примере используются 14 видов материалов, из которых основным является полипропилен.

На листе 2 приведен возможный вариант перепланирования этого задания.

### 8.4.2 Работа с программой

Для работы с программой планирования в MS Excel устанавливается соответствующий рабочий лист, например, лист 1 и осуществляется запуск макроса. Система сообщает о последней дате планирования и предлагает одну из двух возможностей – подготовку планирования с новой датой или повторение расчета с последней датой.

В форме «Ввод данных» задаются основные параметры процесса. Кроме обычных параметров начала и конца вводимых таблиц, здесь предусмотрены поля задания параметров моделирования: амплитуды первого и последующих уровней  $B_0$  и  $B_1$ , параметр начала ограничений  $B_2$  и декремент затухания  $B_3$ . Благодаря этому пользователь получает возможность расширять или сужать дерево решений на каждом уровне и, соответственно, варьировать недоминируемые варианты решений последнего уровня.

Система автоматически рассчитывает загрузку участка (по включенным машинам) и выдает соответствующее сообщение. По окончании расчета все возможные и не доминируемые варианты выводятся на лист. На рис. 8.35 приведен вариант 1.

Из рис. 8.35 видно, что все работы на горизонте расписания автоматически распределены по возможным машинам. Порядок выполнения работ, в значительной степени определяется требуемой датой их выполнения, однако это не всегда так. Напомним, что последовательность

Вариант плана 1	
Машина ТПА1	Прессформа инв.№706: Заказы 1/100%, детали 3 в количестве 1900шт., 10/100%, детали 2 в количестве 2000шт. начало 14, окончание 96час. Прессформа инв.№676: Заказы 4/100%, 9/100%, детали 5 в количестве 2000шт., начало 102, окончание 147час. Прессформа инв.№687: Заказы 3/100%, детали 4 в количестве 1100шт. начало 153, окончание 176час. Прессформа инв.№460: Заказы 11/100%, 15/100%, детали 1 в количестве 2000шт., начало 182, окончание 255час. Прессформа инв.№687: Заказы 21/100%, детали 4 в количестве 3000шт. начало 261, окончание 335час. Прессформа инв.№797: Заказы 27/100%, 25/100%, детали 13 в количестве 2100шт., начало 341, окончание 384час.
Машина ТПА2	Прессформа инв.№667: Заказ 5/20%, детали 6 в количестве 240шт., перепланирование 8час. Прессформа инв.№667: Заказы 5/00%, 23/100%, детали 6 в количестве 1950шт., начало 8, окончание 43час. Прессформа инв.№794: Заказы 2/100%, 18/100%, 29/100%, детали 7 в количестве 3500шт., начало 49, окончание 136час. Прессформа инв.№796: Заказы 7/100%, 22/100%, 19/100%, детали 8 в количестве 5100шт., начало 142, окончание 276час.
Машина ТПА3	Прессформа инв.№790: Заказы 6/40%, 20/50%, 30/50%, детали 9 в количестве 5500шт., начало 18, окончание 211час.
Машина ТПА4	Прессформа инв.№802: Заказ 17/100%, детали 14 в количестве 1600шт., окончание 23час. Прессформа инв.№802: Заказы 24/100%, детали 14 в количестве 1000шт. начало 23, окончание 49час. Прессформа инв.№632: Заказы 28/100%, 14/100%, детали 12 в количестве 2700шт., начало 81, окончание 160час. Прессформа инв.№798: Заказы 8/100%, детали 10 в количестве 1500шт. начало 168, окончание 191час. Прессформа инв.№698: Заказы 16/100%, 12/100%, детали 16 в количестве 2000шт., начало 201, окончание 266час. Прессформа инв.№807: Заказы 13/100%, детали 15 в количестве 1500шт. начало 274, окончание 327час. Прессформа инв.№822: Заказы 26/100%, детали 11 в количестве 1000шт., начало 335, окончание 365час.
Машина ТПА5	Прессформа инв.№223: Заказ 6/20%, детали 9 в количестве 1000шт., перепланирование 8час. Прессформа инв.№223: Заказы 6/40%, 20/50%, 30/50%, детали 9 в количестве 5500шт., начало 8, окончание 219час.

Рис. 8.35 Вариант 1 возможного расписания

выполнения работ устанавливается по цепочке дерева решений для последнего уровня построения этого дерева. В этой цепочке имеются различные недоминируемые решения предыдущих уровней, включающие неочевидные последовательности работ. В данном случае оказалось целесообразным объединить выполнение работы 1 с работой 10, используя одну прессформу №706.

Аналогично, начатая ранее на машине 2 работа 5 продолжается, и затем к ней присоединяется работа 23. Только после этого планируется выполнение работы 2, к которой также присоединяются работа 18 и 29.

На машине 4, как это сразу планировалось, сначала полностью выполняется ранее начатая работа 17, а затем, без смены прессформы, работа 24.

По окончании расчета на лист выводится коэффициент плановой загрузки и значения еженедельного коэффициента обеспеченности персоналом. Из всех вариантов определяются лучшие, рекомендуемые в соответствии с методами Сэвиджа и Гурвица. Кроме того, для всех не доминируемых вариантов выводятся данные о значениях критериев  $U, V$  (рис. 8.36), а также значения основных показателей расписания: коэффициента неравномерности загрузки  $K_n$ , коэффициентов группирования  $K_g$  и запаздывания  $K_z$ , полной длительности выполнения расписания  $Stax$ , среднего  $Tc$  и наибольшего  $Tmax$  запаздываний.

Величина коэффициента плановой загрузки вычисляется по формуле 2.8, коэффициент неравномерности загрузки определяется по формуле 2.7, коэффициент группирования по формуле 2.1, коэффициент запаздывания – формулой 2.3. В данном случае рекомендуемым является вариант 1.

Для каждой машины указана последовательность устанавливаемых прессформ. Эта последовательность подобрана таким образом, чтобы иметь возможность выполнить несколько заказов без переустановки прессформ. Например на машине ТПА1 в начале расписания устанавливается прессформа №706, на которой последовательно выполняются детали вида 3 и детали вида 2 (это возможно, поскольку они отличаются только цветом). На прессформе №676 также выполняются 2 заказа – заказ 4 и заказ 9; на прессформе №460 выполняются заказы 11 и 15. Исключение составляет только прессформа №587, которую планируется устанавливать дважды – для работ 3 и 21. Причина состоит в слишком большой разнице сроков выполнения: срок выполнения работы 3 составляет 3 дня, а работы 21 – 11дней.

На машине ТПА2 к началу планирования уже установлена прессформа №567, на которой выполнялся заказ 5. Поэтому оказалось целесообразным использовать эту же прессформу для выполнения заказа 23. Затем устанавливается прессформа №794, на которой производится

**Коэффициент плановой загрузки: 0,5**  
**Еженедельный коэффициент обеспеченности персоналом:**  
 неделя 1 : 0,92  
 неделя 2 : 1,01  
 неделя 3 : 1  
**Рекомендуемые варианты: по методу Сэвиджа - вариант 1, по методу Гурвица - вариант 1**  
**Показатели вариантов расписания:**  
 относительные затраты на наладку набора работ  $U$ ; средняя полезность заказов  $V$ ;  
 коэффициент неравномерности загрузки  $K_n$ ; коэффициент группирования  $K_g$ ; коэффициент запаздывания  $K_z$ ;  
 полная длительность выполнения  $Stax$ , среднее  $Tc$  и наибольшее  $Tmax$  запаздывания в календарных часах  
 Начальные значения критериев:  $U = 0$ ;  $V = 7,161$   
 Вариант 1:  $U = 27,222$ ;  $V = 17,011$ ;  $K_n = 1,8$ ;  $K_g = 1,76$ ;  $K_z = 0,57$ ;  $Stax = 384$ ;  $Tc = 27,5$ ;  $Tmax = 111$   
 Вариант 2:  $U = 27,222$ ;  $V = 16,983$ ;  $K_n = 1,8$ ;  $K_g = 1,76$ ;  $K_z = 0,57$ ;  $Stax = 384$ ;  $Tc = 27,5$ ;  $Tmax = 111$   
 Вариант 3:  $U = 27,222$ ;  $V = 13,317$ ;  $K_n = 1,8$ ;  $K_g = 1,76$ ;  $K_z = 0,5$ ;  $Stax = 384$ ;  $Tc = 27,6$ ;  $Tmax = 139$

**Рис. 8.36** Значения показателей расписания для различных вариантов

выполнение заказов 2, 18 и 29, после чего на прессформе №796 выполняются заказы 7, 22 и 19. Детали 9 изготавливаются в большом количестве, поэтому для их производства используются 2 машины ТПА3 и ТПА5, и соответственно 2 прессформы – №223 и №790.

Поскольку детали конкретного вида могут изготавливаться только на некоторых машинах из общего числа, а потребность в различных деталях очень отличается, то разные машины имеют существенно разную загрузку. В результате, несмотря на относительно средний коэффициент загрузки, равный 0,6, коэффициент запаздывания равен 0,5, т.е. запаздывают 15 заказов из 30. Одновременно величина среднего запаздывания довольно велика и составляет 27,5 часа, т.е. больше суток, величина же наибольшего запаздывания  $T_{max}$  довольно велика и равна 111 часов, т.е. примерно 4,5 суток.

### 8.4.3 Листинг основной части программы

На рис. 8.37 приведен расчет ежедневного рабочего времени  $E$  и суточного коэффициента обеспеченности персоналом  $K_s$ . При расчете учитывается время обслуживания машин  $NE$ , длительность каждой смены  $N_{hour}$  и количество персонала в смене  $NPers$ .

На рис. 8.38 приведен фрагмент программы расчета обеспечения материалами на первом уровне построения дерева решений. При организации каждого нового узла проверяется наличие всех материалов, используемых для деталей текущего вида. Если имеющееся количество применяемого материала меньше, чем количество, требуемое для выполнения всего заказа или его остатка, возможное количество деталей в момент планирования ограничивается этим материалом.

```

UpperLeft3 = Cells(1, "AD").Value 'Имя первой ячейки рабочего календаря'
LowerRight3 = Cells(1, "AE").Value 'Имя последней ячейки календаря рабочих смен
Delta = Range(UpperLeft3, LowerRight3).Columns.Count 'количество дней в календаре
Alfa = Range(UpperLeft3, LowerRight3).Row + 1
Gamma = Range(UpperLeft3, LowerRight3).Column
ReDim E(Delta) 'массив рабочего времени в календарный день
ReDim Ks(Delta) 'массив коэффициентов обеспеченности персоналом
ReDim NE(MMach, Delta) 'массив часов обслуживания машин
For j = 1 To Delta 'для каждого календарного дня
  For i = 1 To NShift 'по сменам
    Nhour = Cells(Alfa + i, Gamma + j - 1).Value 'длительность каждой смены
    NPers = Cells(Alfa + NShift + i, Gamma + j - 1).Value
    'количество персонала в текущей смене
    Ks(j) = Ks(j) + Nhour * NPers 'накопление фонда персонала в день
    E(j) = E(j) + Cells(Alfa + i, Gamma + j - 1).Value 'накопление длительности рабочего дня
  Next i
  Ecs = E(j) * MMach 'дневной фонд времени участка
  For i = 1 To MMach 'по всем машинам
    NE(i, j) = Cells(Alfa + NShift + i, Gamma + j - 1).Value
    'длительность времени планового ремонта на каждой машине
    Ecs = Ecs - NE(i, j) 'фонд участка с учетом времени ремонта
  Next i
  If Ecs > 0 Then 'для рабочих дней
    Ks(j) = Round(Ks(j) / Ecs, 2) 'суточный коэффициент обеспеченности персоналом
  Else 'для нерабочих дней
    Ks(j) = 1
  End If
Next j

```

Рис. 8.37 Расчет коэффициента обеспеченности персоналом

```

For i = 1 To Beta          'цикл по заказам (первый уровень)'
  aJ(i) = 0.5             'строится узел первого уровня с i-ой выполняемой работой '
  m = VidS(i) ' вид работы (деталь)
  NMax = KolP(i) 'наибольшее возможное количество в момент планирования (остаток заказа)
  JobV = NMax 'возможное количество в момент планирования из расчета по материалу
  For j = 1 To NMat 'по всем материалам
    KolM(j) = KolP(i) * NozMM(m, j) / 1000
    ' требуемое количество материала на заказ в тоннах
    If NozMM(m, j) > 0 Then 'для требуемого материала
      If KolM(j) > Stock(j) Then 'если требуемое количество материала больше имеющегося
        JobV = Stock(j) / NozMM(m, j) * 1000
        'возможное количество в момент планирования из расчета по материалу
      End If
      If JobV < NMax Then 'если количество конкретного материала ограничивает
        NMax = JobV 'возможное количество в момент планирования
      End If
    End If
  Next j
  ...
Next i

```

Рис. 8.38 Расчет обеспечения материалами

После проверки ограничений по материалам программа переходит к определению параметров очередного узла дерева решений. Задача осложняется тем, что, вообще говоря, для деталей одного вида иногда могут использоваться несколько одинаковых прессформ, имеющих, конечно, различные инвентарные номера. Поэтому программа снабжена двумя вариантами расчета параметров.

В первом случае считается, что используется только одна прессформа, и, соответственно, заказ должен быть выполнен на этой прессформе на 100%. В противном случае, заказ может делиться на такое количество частей, сколько имеется прессформ текущего вида, хотя это, конечно и не обязательно.

После определения параметров всех узлов первого уровня производится определение недоминируемых вариантов стандартным способом, т.е. по параметрам  $U$ ,  $V$  и  $gs$ . В данном примере недоминируемые варианты узлов первого уровня контролируются по их длительности (рис. 8.39). Для ветвей первого уровня установлен специальный коэффициент длительности  $B0$ .

В каждом узле на последующих уровнях фиксируются такие его параметры как, затраты  $U$ , полезность  $V$ , фиктивная длительность  $FComp$ , номер машины  $Mach$  и номер прессформы  $Form$ . Для определения фактического наличия материалов, а также процентов выполнения заказов необходимо восстановить цепочку узлов дерева от начального состояния до текущего узла. Поэтому в каждом текущем узле приходится сначала переопределять начальное состояние заказов, машин и прессформ (рис. 8.40).

Имея начальное состояние, по цепочке дерева программа находит расход всех использованных материалов и процент выполнения каждого заказа в текущем узле (рис. 8.41).

После определения момента возможного создания следующего узла дерева необходимо проверить наличие всех необходимых материалов в этот момент. Для этого определяется моменты появления положительных запасов по каждому виду материала (рис. 8.42).

Если время появления комплекта положительных запасов по необходимым для конкретной детали видам материалов больше момента освобождения машины, то начало обработки в новом узле соответственно сдвигается. После определения параметров всех узлов текущего уровня производится определение недоминируемых вариантов стандартным способом.

```

Flagg = 0 'флаг начального значения длительности
For i = 1 To intU 'по всем узлам уровня
  If MetCurStage(i) = 0 Then 'для недоминируемых узлов'
    If Flagg = 0 Then
      sngCz = CompStage(i) 'установка начального значения длительности ветви'
      Flagg = 1
    Else
      If CompStage(i) < sngCz Then
        sngCz = CompStage(i) 'нахождение минимальной длительности ветви'
      End If
    End If
  End If
Next i
n = 0
For i = 1 To intU
  If MetCurStage(i) = 0 And CompStage(i) <= B0 * sngCz Then
    'включение не доминируемых ветвей в установленном диапазоне длительности'
    n = n + 1 'недоминируемые узлы на текущем уровне'
    TreeStage(n) = i 'номера разветвляемых узлов первого уровня'
  End If
Next i

```

Рис. 8.39 Отбор ветвей первого уровня по длительности

```

For j = 1 To NMach 'по всем машинам
  If MetkaM(j) = 1 Then 'для включенных машин
    NMach(j) = P0(j) 'прессформа, установленная на машине в начальный момент
    'по начатым партиям
    If Order0(j) > 0 Then
      m = Determin5(Beta, Order0(j)) 'номер строки в списке заказов
      If ex(m) = 100 Then 'перестройка машин с уже действующего заказа не допускается
        C1(j) = Tn + Kol(m) / 3600 * Z0(j) / 100 * p(Vid5(m), j) * (1 - C0(j) / 100)
        'ожидаемый момент окончания начальной партии на машине в часах
      Else
        Order(m) = Order(m) + Z0(j) * C0(j) / 100
        'плановый процент выполнения заказа в уже начатых партиях на начальный момент
        C1(j) = Tn
      End If
      Cp(P0(j)) = -C1(j) ' время освобождения прессформы
      '(знак минус является флагом определения использования прессформы в начальном состоянии)
    Else
      C1(j) = Tn
    End If
  End If
Next j

```

Рис. 8.40 Восстановление начального состояния в каждом текущем узле

Вывод полученного решения осложняется необходимостью отсортировки узлов каждого недоминируемого варианта по машинам и прессформам. Поэтому используется достаточно сложная программа записи на листе. В конце расчета на лист выводится коэффициент плановой загрузки, значения еженедельного коэффициента обеспеченности персоналом и показатели каждого варианта.

```

k = TreeStage(intZ)          'номер последнего узла '
m = VidS(NP(k))            'вид детали в узле
Do Until k = 0 'восстановление цепочки
  If Comp(k) > C1(Mach(k)) Then
    'если время окончания работы машины в узле больше последнего времени для этой машины
    FMach(Mach(k)) = Form(k) 'последняя прессформа, установленная на машине'
    C1(Mach(k)) = Comp(k)    'последний момент окончания работы машины в узле дерева
  End If
  If Comp(k) > Cp(Form(k)) Then
    Cp(Form(k)) = Comp(k) 'последний момент окончания работы прессформы в узле дерева '
  End If
  For j = 1 To NMat
    Distr(j) = Distr(j) + Proc(k) / 100 * NormM(m, j) * KolP(NP(k)) / 1000
    'накапливание расхода по каждому виду материала в тоннах
  Next j
  Order(NP(k)) = Order(NP(k)) + Proc(k) ' наибольший процент выполнения каждого заказа
  k = Par(k) 'переход по цепочке'
  If k > 0 Then
    m = VidS(NP(k)) 'вид детали в узле
  End If
Loop 'продолжение цикла дерева

```

Рис. 8.41 Расчет процентов выполнения заказов и расхода материалов в текущем узле

```

For i = 1 To NMat 'по всем видам материалов
  Flagg = 0 'флаг выхода из цикла
  j = 0
  Do Until Flagg = 1
    j = j + 1 'дни после начала работы
    Stock(i) = Stock(i) + R(i, j) 'накопление поступлений в тоннах по видам
    If Stock(i) - Distr(i) > 0 Then 'если появляется положительный запас
      'текущий расчетный запас по виду в тоннах на текущий день с учетом расхода в цепочке
      Mom1(i) = (j - 1) * E(j) 'момент появления положительного запаса в часах
      Flagg = 1 'установка флага конца цикла поиска дней поступления материала
    End If
    If j = DeltaM Then 'ограничитель цикла
      Resp = MsgBox("Нехватка материала " & i & ". Продолжать?", vbYesNo)
      If Resp = vbNo Then
        Exit Sub
      End If
      Flagg = 1
    End If
  Loop
Next i

```

Рис. 8.42 Определение моментов появления положительных запасов материалов

#### 8.4.4 Перепланирование расписания

Как было указано в п. 8.4.1. задание на 12.10.16 8:00 состоит из 30 работ шестнадцати видов. В случае, показанном на календарном графике, в течение первого и второго рабочего дня планируются две 12-часовые рабочие смены. Следующий календарный день выходной, после которого опять планируется двухсменная работа.

Положим, что в первый день планирования выполнялся вариант решений 1, показанный на рис. 8.35. Допустим, что к концу первого рабочего дня появилась срочная работа 31, в результате чего потребовалось перепланирование, которое, как обычно, производится на момент 8 часов следующего рабочего дня.

Поскольку продолжительность первого рабочего дня (начинается в 8 часов) в данном случае составляет 24 часа, при работе в точном соответствии с расписанием, в течение этого дня (до момента 32 часа) на первой машине должна выполняться работа 1. Рассчитаем процент выполнения работы 1 к моменту 32 часа.

Процессное время одной детали 3, изготавливаемой в работе 1, на машине 1 составляет 50 секунд. Поэтому за 1 час выпускается  $3600/50=72$  детали. Работа 1 (рис. 8.35) начинается в 14 часов и к моменту 32 часа изготавливается  $(32-14)*72=1296$  деталей, что составляет примерно 68% от всего заказа, равного 1900 деталей.

Вследствие нехватки персонала на первой недели (рис. 8.36) какая-то часть работы будет не выполнена. Здесь полагается, что на всех машинах произойдет снижение производительности, соответствующее коэффициенту обеспеченности персоналом – в данном случае равном 0,92. Поэтому плановый процент выполнения работы 1 составит  $68 \times 0,92 = 62\%$ .

К моменту начала первого дня на машине 2 ожидается выполнение 20% необходимых деталей 6 ранее начатой работы 5 объемом в 1200 шт., что составляет 240 деталей. Для изготовления одной детали 6 на машине 2 требуется 60 секунд, т.е. за 1 час выпускается 60 деталей. Оставшееся количество равно  $1200 - 240 = 960$  шт., и окончание выполнения этой работы, начинающееся в 8 часов, с учетом коэффициента обеспеченности, имеет место в  $8 + 960/60/0,92 = 26$  часов.

Поэтому работа 5 в течение первого дня должна быть выполнена на 100%, и после на этой же прессформе должна быть начата работа 23. Подсчитывая трудоемкость работы 23, получаем, что к моменту 32 часа эта работа должна быть выполнена на 33%. Аналогичным образом рассчитываем выполнение работ на остальных машинах. На машине 4 работа 17 должна быть выполнена на 100% в 23 часа, после чего без переустановки прессформы планируется начать работу 24, которая к моменту 32 часа должна быть выполнена на 27%.

Для корректировки расписания скопируем лист 1 на лист 2, очистим этот лист от результатов предыдущего расчета и введем данные о выполнении. Кроме того, в конце исходной таблицы запишем строку нового задания (рис. 8.43). Состояние машин также корректируется на новую дату, а календарный график сдвигается на единицу влево.

После подготовки к перепланированию удаляются строки с выполнением на 100%, а требуемый момент готовности уменьшается на единицу. После запуска программы обычным способом, в данном случае программа предлагает три варианта, из которых выбран первый (рис. 8.44).

Из рис. 8.44 следует, что появление срочной работы 31 существенно изменяет расписание на первой машине. После окончания работы 1 предусматривается не переход к работе 10, а переустановка новой прессформы, необходимой для выполнения работы 31. Поскольку для работы 31 изготавливаются детали вида 4, то к этому заказу подсоединяется работа 3 с деталями такого же вида. Работа 10 значительно сдвигается во времени, и в результате длительность работа машины 1 увеличивается и существенно превосходит длительность работы других машин. На остальных машинах расписание изменяется незначительно.

Заказ (№ работы)	Требуем	Вид работы (деталь)	Количество во в шт.	Весовой	Отметка
	ый календарный день готовности и после начала				
1	1	3	1900	3	62
2	2	7	1000	1	0
3	3	4	1100	1	0
4	3	5	1000	1	0
5	4	6	1200	1	100
6	4	9	5000	3	56
7	5	8	2100	1	0
8	5	10	1500	1	0
9	7	5	1000	1	0
10	7	2	2000	1	0
11	8	1	1000	1	0
12	8	16	1000	1	12
13	9	15	1500	1	0
14	9	12	1000	1	0
15	9	1	1000	1	0
16	9	16	1000	1	0
17	10	14	1600	1	100
18	10	7	1500	1	0
19	10	8	2000	1	0
20	11	9	4000	1	0
21	11	4	3000	1	0
22	13	8	1000	1	0
23	13	6	1000	1	33
24	13	14	1000	1	18
25	13	13	1100	1	0
26	15	11	1000	1	0
27	15	13	1000	1	0
28	17	12	1700	1	0
29	17	7	1000	1	0
30	17	9	3000	1	0
31	1	4	2000	5	0

Рис. 8.43 Выполнение исходного задания по состоянию на 13.10.16 8:00

Как указывалось ранее, используемый алгоритм часто приводит к доминированию работ с меньшей трудоемкостью над другими возможными работами, даже в том случае, если последние требуются раньше. В данном примере работа 25 имеет заметно меньшую трудоемкость, чем работа 10, и выполнение работы 25, а также однотипной работы 27, планируется раньше, чем для работы 10. В данном случае можно изменить составляемое расписание, если для работы 10 установить весовой коэффициент, равный пяти. В результате расписание примет вид, показанный на рис. 8.45.

Вариант плана 1	
Машина ТПА1	Прессформа инв.№706: Заказ 1/62%, детали 3 в количестве 1178шт., перепланирование 8час. Прессформа инв.№708: Заказы 1/38%, детали 3 в количестве 722шт. начало 8, окончание 18час. Прессформа инв.№587: Заказы 31/100%, 3/100%, детали 4 в количестве 3100шт., начало 24, окончание 115час. Прессформа инв.№676: Заказы 4/100%, 9/100%, детали 5 в количестве 2000шт., начало 121, окончание 166час. Прессформа инв.№460: Заказы 15/100%, 11/100%, детали 1 в количестве 2000шт., начало 172, окончание 244час. Прессформа инв.№797: Заказы 27/100%, 25/100%, детали 13 в количестве 2100шт., начало 250, окончание 300час. Прессформа инв.№706: Заказы 10/100%, детали 2 в количестве 2000шт. начало 306, окончание 334час. Прессформа инв.№587: Заказы 21/100%, детали 4 в количестве 3000шт., начало 340, окончание 433час.
Машина ТПА2	Прессформа инв.№567: Заказ 23/33%, детали 6 в количестве 330шт., перепланирование 8час. Прессформа инв.№567: Заказы 23/67%, детали 6 в количестве 670шт. начало 8, окончание 19час. Прессформа инв.№794: Заказы 2/100%, 18/100%, 29/100%, детали 7 в количестве 3500шт., начало 25, окончание 112час. Прессформа инв.№796: Заказы 22/100%, 7/100%, 19/100%, детали 8 в количестве 5100шт., начало 118, окончание 253час.
Машина ТПА3	Прессформа инв.№790: Заказ 6/20%, детали 9 в количестве 1000шт., перепланирование 8час. Прессформа инв.№790: Заказы 30/100%, 20/50%, детали 9 в количестве 5000шт., начало 8, окончание 161час.
Машина ТПА4	Прессформа инв.№802: Заказ 24/18%, детали 14 в количестве 180шт., перепланирование 8час. Прессформа инв.№802: Заказы 24/82%, детали 14 в количестве 820шт. начало 8, окончание 28час. Прессформа инв.№798: Заказы 8/100%, детали 10 в количестве 1500шт. начало 60, окончание 86час. Прессформа инв.№698: Заказы 10/100%, 16/100%, детали 16 в количестве 2000шт., начало 94, окончание 138час. Прессформа инв.№807: Заказы 13/100%, детали 15 в количестве 1500шт. начало 146, окончание 193час. Прессформа инв.№822: Заказы 26/100%, детали 11 в количестве 1000шт. начало 225, окончание 246час. Прессформа инв.№632: Заказы 14/100%, 28/100%, детали 12 в количестве 2700шт., начало 254, окончание 334час.
Машина ТПА5	Прессформа инв.№223: Заказ 6/17%, детали 9 в количестве 840шт., перепланирование 8час. Прессформа инв.№223: Заказы 6/44%, 20/50%, детали 9 в количестве 4200шт., начало 8, окончание 155час.

Рис. 8.44 Расписание после перепланирования на 13.10.16 8:00

Вариант плана 2	
Машина ТПА1	Прессформа инв.№706: Заказ 1/62%, детали 3 в количестве 1178шт., перепланирование 8час. Прессформа инв.№706: Заказы 1/38%, детали 3 в количестве 722шт. начало 8, окончание 18час. Прессформа инв.№587: Заказы 31/100%, 3/100%, детали 4 в количестве 3100шт., начало 24, окончание 115час. Прессформа инв.№706: Заказы 10/100%, детали 2 в количестве 2000шт. начало 121, окончание 149час. Прессформа инв.№460: Заказы 11/100%, 15/100%, детали 1 в количестве 2000шт., начало 155, окончание 228час. Прессформа инв.№676: Заказы 4/100%, 9/100%, детали 5 в количестве 2000шт., начало 234, окончание 285час. Прессформа инв.№797: Заказы 27/100%, 25/100%, детали 13 в количестве 2100шт., начало 291, окончание 334час. Прессформа инв.№587: Заказы 21/100%, детали 4 в количестве 3000шт., начало 340, окончание 433час.
Машина ТПА2	Прессформа инв.№567: Заказ 23/33%, детали 6 в количестве 330шт., перепланирование 8час. Прессформа инв.№567: Заказы 23/67%, детали 6 в количестве 670шт. начало 8, окончание 19час. Прессформа инв.№794: Заказы 2/100%, 18/100%, 29/100%, детали 7 в количестве 3500шт., начало 25, окончание 112час. Прессформа инв.№796: Заказы 7/100%, 22/100%, 19/100%, детали 8 в количестве 5100шт., начало 118, окончание 253час.
Машина ТПА3	Прессформа инв.№790: Заказ 6/20%, детали 9 в количестве 1000шт., перепланирование 8час. Прессформа инв.№790: Заказы 30/100%, 20/50%, детали 9 в количестве 5000шт., начало 8, окончание 161час.
Машина ТПА4	Прессформа инв.№802: Заказ 24/18%, детали 14 в количестве 180шт., перепланирование 8час. Прессформа инв.№802: Заказы 24/82%, детали 14 в количестве 820шт. начало 8, окончание 28час. Прессформа инв.№798: Заказы 8/100%, детали 10 в количестве 1500шт. начало 60, окончание 86час. Прессформа инв.№698: Заказы 12/100%, 16/100%, детали 16 в количестве 2000шт., начало 94, окончание 138час. Прессформа инв.№807: Заказы 13/100%, детали 15 в количестве 1500шт. начало 146, окончание 193час. Прессформа инв.№632: Заказы 14/100%, 28/100%, детали 12 в количестве 2700шт., начало 225, окончание 308час. Прессформа инв.№822: Заказы 26/100%, детали 11 в количестве 1000шт. начало 316, окончание 336час.
Машина ТПА5	Прессформа инв.№223: Заказ 6/17%, детали 9 в количестве 840шт., перепланирование 8час. Прессформа инв.№223: Заказы 6/44%, 20/50%, детали 9 в количестве 4200шт., начало 8, окончание 155час.

Рис. 8.45 - Расписание с увеличенным весовым коэффициентом работы 10

## Расписания для гибких поточных линий

9.1 Введение .....	185	9.3.3 Анализ результатов планирования .....	204
9.2 Расписания для гибких линий с заданными и постоянными размерами партий .....	186	9.3.4 Листинг основной части программы .....	209
9.2.1 Исходные данные задачи .....	187	9.3.5 Перепланирование расписания .....	216
9.2.2 Работа с программой .....	188	9.3.6 Моделирование расписания .....	218
9.2.3 Анализ результатов планирования .....	190	9.4 Расписания для гибких линий процессного производства с позаказным планированием .....	219
9.2.4 Листинг основной части программы .....	192	9.4.1 Исходные данные задачи .....	220
9.2.5 Перепланирование расписания .....	196	9.4.2 Работа с программой .....	222
9.2.6 Моделирование расписания .....	198	9.4.3 Анализ результатов планирования .....	223
9.3 Расписания для гибких линий с ограниченными размерами партий .....	199	9.4.4 Листинг основной части программы .....	225
9.3.1 Исходные данные задачи .....	202	9.4.5 Перепланирование расписания .....	235
9.3.2 Работа с программой .....	203	9.4.6 Моделирование расписания .....	238

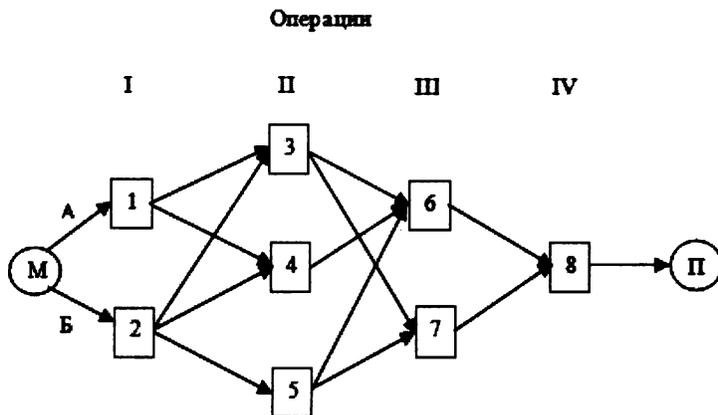
### 9.1 Введение

В гибкой поточной линии на каждой операции возможно использование нескольких или одной машины. При выпуске продукта любого вида на одной линии над этим продуктом последовательно выполняются возможные операции линии, причем для некоторых видов продуктов не все машины могут быть использованы. На рис. 9.1 приведен пример такой линии, предназначенной для выполнения четырех последовательных операций

Со склада сырья М материалы могут подаваться транспортным устройством или по трубам на машины 1 или 2 для первой операции. Допустим, что на линии возможно параллельное изготовление двух различных продуктов А и Б. На рис. 9.1 показано, что на второй операции для изготовления продукта А возможно использование машин 3 и 4, а для продукта Б – всех трех машин 3, 4, 5.

Возможность передачи продукта с конкретной машины второй операции на машины третьей операции зависит от того, какой это продукт. Очевидно, что на машине 5 может находиться только продукт Б, но на машинах 3 и 4 возможно появление обоих продуктов. Допустим, что на третьей операции на машине 7 невозможно изготовление продукта А, тогда как на машине 6 могут перерабатываться оба продукта. Соответственно в данном примере показан случай, когда на машине 3 находится продукт Б, а на машине 4 – продукт А. На операции 4 показана одна машина 8, на которой могут окончательно обрабатываться оба продукта, которые в дальнейшем передаются на склад готовой продукции П.

Ресурсы гибкой поточной линии существенно экономятся при использовании группового планирования. Обычно переналадка любой машины в линии требуется при переходе этой машины на новый вид обрабатываемого продукта. Как было показано в предыдущей главе,



**Рис. 9.1** Пример структуры гибкой поточной линии

групповое расписание возможно как при заказном планировании, так и при планировании «на склад».

В современных условиях работа «на склад», по-видимому, обычно целесообразна в условиях неограниченного сбыта выпускаемой продукции, что встречается относительно редко, и, как правило, выпуск продукции на поточной линии диктуется наличием внешних заказов на различные виды продуктов. Более того, в тех случаях, когда производитель по некоторым продуктам, вследствие срочности их применения, предпочитает иметь некоторые страховые запасы, например по авиационным запчастям, их изготовление целесообразно выполнять по внутренним заказам самого производителя. Поэтому в настоящей главе рассматривается позаказное планирование для гибких поточных линий как для дискретного, так и для процессного производства.

При разработке группового расписания для гибкой поточной линии, на которой возможно изготовление различных продуктов, необходимо на всех операциях объединять партии продуктов (работы) в группы и распределять эти партии по машинам. В данной главе будем руководствоваться теми же критериями оптимизации, которые были установлены в предыдущих главах. Здесь рассматриваются три задачи составления расписания для гибких поточных линий, включающих на каждой операции несколько не одинаковых параллельных машин, причем учитывается как необходимость своевременного выполнения каждой работы, так и экономия затрат на переналадку машины.

## 9.2 Расписания для гибких линий с заданными и постоянными размерами партий

Рассмотрим задачу составления расписания для гибкой поточной линии при последовательном выполнении работ, прибытие которых запланировано в различное время  $t_i$ . При этом учитывается как необходимость своевременного завершения каждой работы с заданным сроком выполнения  $d_i$ , так и экономия затрат на переналадку машин линии.

Согласно структурной формуле теории расписаний, поставленная задача при дискретном типе производства может быть записана как

$$FF|r_i, d_i, s_{jom}|U, \bar{V}, \quad (9.1)$$

где  $FF$  – обозначение гибкой поточной линии;  $s_{jom}$  – длительность переналадки машины  $m$  на продукты вида  $j$  с продуктов вида  $o$ ;  $U$  – относительные затраты для выполнения всех работ;  $\bar{V}$  – средняя полезность заказов за время выполнения расписания. В этой задаче не ставится каких-либо ограничений на размеры работ на любой операции, причем каждая работа выполняется как одна партия.

Для расчета расписания, как и в предыдущей главе, используется компьютерная программа, работающая на основе функций полезности и представляющая собой макрос на языке VBA для электронной книги MS Excel, результаты выполнения записываются листах и формах книги.

### 9.2.1 Исходные данные задачи

Исходные данные для составления расписания записываются на листе MS Excel электронной книги MBook7.xls, состоящей из пяти листов. На листе 1 в табл. \$A\$5:\$O\$29 находится задание, состоящее из двадцати пяти работ шести различных видов, фрагмент которого приведен на рис. 9.2. Работы выполняются последовательно на пяти операциях, для чего в гибкой поточной линии установлены 9 машин.

В каждой строке задания описываются параметры работ: номер работы; требуемый момент дня готовности; ожидаемый момент поступления заготовки в календарных днях; вид работы; весовой коэффициент работы и номер последней законченной операции. Каждая работа может находиться либо на самой машине, либо в месте, непосредственно предназначенном для загрузки на машину, либо в ожидании новой операции в месте хранения. В данном случае

Обозначение (№ работы)	Требуемый календарный день готовности и после начала	Ожидаемый календарный день поступления после начала	Вид работы	Весовой коэффициент	Отметка последней законченной операции	Трудоемкость в нормочасах на машине								
						1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	-1	0	1	5	0	3	3	4	3	4	2	3	3	2
2	0	0	2	3	1	3	3	4	3	4	2	3	3	2
3	0,5	0	1	1	1	2	2	3	-1	3	1	2	2	1
4	1	0	3	1	1	4	4	5	4	5	-1	4	4	-1
5	1	0	1	1	2	2	2	3	1	3	1	1	2	1
6	1	1	2	1	0	-1	-1	4	3	4	2	-1	-1	2
7	1	0	3	1	5	2	2	3	2	3	1	2	2	1
8	1	0	1	1	3	3	3	-1	3	-1	-1	3	4	-1
9	1	0	1	5	1	4	4	5	4	5	3	4	4	3
10	2	0	3	1	3	3	3	4	3	4	1	3	3	1
11	2	0	4	1	4	4	3	4	3	4	1	3	3	1
12	3	0	3	1	0	2	-1	3	2	3	-1	2	-1	-1
13	3	0	5	1	0	4	4	4	4	4	3	4	4	3
14	3	0	3	1	0	3	3	4	3	4	2	3	3	2
15	3	0	6	1	0	2	2	3	2	3	1	2	2	1

Рис. 9.2 Фрагмент исходного задания на листе 1

предполагается, что емкость этих мест не ограничена и каждая работа на любой операции представляет собой одну партию загрузки.

Для каждой из работ приведено время выполнения работы на соответствующей машине. Если работа на какой-то из машин не может быть выполнена, в соответствующей графе записывается значение -1. Целесообразно записывать работы в порядке возрастания требуемых дат их выполнения.

Моменты готовности и поступления работ, как обычно, отсчитываются от момента наступления календарного дня, являющегося первым в расписании. Под видом работы понимается любой параметр работы, вызывающий необходимость в переналадке машины.

В табл. \$V\$20:\$BW\$25 приведены нормы времени в часах на переналадку с одного вида работы на другой для каждой из девяти машин. При этом, как и раньше, полагается, что номер предыдущего вида работы устанавливается по столбцу таблицы, а номер последующего вида работы – по строке таблицы.

В табл. \$U\$4:\$AC\$12 записаны данные каждой из машин, одна из которых в данном случае находится в отключенном состоянии. Каждая из машин предназначена для выполнения одной из операций технологического процесса и относится к соответствующей группе. По каждой работающей машине приведены данные о ее настройке на конкретную работу на момент планирования (начало нового рабочего дня) и ожидаемый на этот момент процент ее выполнения.

Если работа находится на машине и к моменту планирования процент ее выполнения меньше 100, то последней законченной операцией является предыдущая операция, либо нуль. Если ожидаемый процент работы, находящейся на машине, равен 100, то такая операция считается выполненной. Если работа находится в месте хранения, то номер ее законченной операции определяется по последней операции на соответствующей машине.

В данном примере работа 1 находится на машине 2, выполняющей операцию 1, и ожидаемый процент готовности составляет 20%. Поэтому номер последней законченной операции для работы 1 равен 0. Наоборот, работа 3 на машине 1 для операции 1 имеет ожидаемый процент готовности 100 и поэтому в таблице на рис. 9.2 имеет отметку 1. Аналогично, работа 4 на машине 3 и операции 2 имеет готовность 50% и отметку законченной операции 1, а работа 5 на машине 5 для операции 2 имеет готовность 100% и соответственно отметку законченной операции 2. Работа 7 еще находится на машине 9, хотя ее обработка уже полностью закончена, и соответствующая отметка операции равна 5. Некоторые работы могут быть начаты и находиться в местах хранения: например, работа 2 и работа 9 после выполнения операции 1.

В табл. \$Y\$29:\$AI\$41 описан календарный график работы машины по дням, начинающийся с первого дня выполнения составляемого расписания. Для каждой смены календарного дня проставлено количество рабочих часов, для каждой машины указано плановое время проведения технического обслуживания. В приведенном примере предусмотрена двухсменная работа с восьмичасовым рабочим днем.

На листе 2 приведен возможный вариант перепланирования этого задания, на листе 3 проводится моделирование по различным параметрам. На листе 4 находится задание для 75 работ, на листе 5 приведен пример моделирования с целью нахождения рационального горизонта планирования.

## 9.2.2 Работа с программой

Для работы с программой планирования в MS Excel устанавливается соответствующий рабочий лист, например, лист 1 и осуществляется запуск макроса. При выборе опции «без моделирования», система сообщает о последней дате планирования и предлагает одну из двух

возможностей – подготовку планирования с новой датой или повторение расчета с последней датой.

В форме «Ввод данных» задаются основные параметры процесса. Система автоматически рассчитывает загрузку участка (по включенным машинам) и выдает соответствующее сообщение. По окончании расчета все возможные и не доминируемые варианты выводятся на лист (рис. 9.3).

В каждом варианте работы сгруппированы по видам, а группы выделены скобками. Внутри группы последовательность работ не обязательно совпадает с порядком их номеров, поскольку работы в одной группе могут иметь различную трудоемкость. Если резерв времени выполнения всех работ в одной группе положительный, то система иногда рекомендует выполнять сначала работы с меньшей трудоемкостью с тем, чтобы понизить суммарную длительность производственного цикла.

По окончании расчета на лист выводятся коэффициенты загрузки по каждой группе машин, а также номера вариантов, рекомендуемые в соответствии с методами Сэвиджа и Гурвица. Кроме того, для всех не доминируемых вариантов выводятся данные о значениях критериев  $U$ ,  $V$  (рис. 9.4), а также значения основных показателей расписания: коэффициента неравномерности загрузки  $K_n$ , коэффициентов группирования  $K_g$  и запаздывания  $K_z$ , полной длительности выполнения расписания  $Сmax$ , среднего  $T_c$  и наибольшего  $Tmax$  запаздываний.

В приведенном примере группы машины, предназначенные для различных операций, загружены не одинаково. Наибольшая загрузка в 81% наблюдается в группах 3 (машина 6) и 5 (машина 9), наименьшая, равная 58% – в группе 2. Программа автоматически создает рас-

Недоминируемые варианты	
Вариант 1	Машина 1: 19, 12, (24, 17), 20, (18, 23)
Вариант 1	Машина 2: 15, (21, 16), 14, 22, 13, 25
Вариант 1	Машина 3: 19, 15, 24, 12, 9, (13, 20), 22, 17
Вариант 1	Машина 5: (1, 3), (21, 2, 6, 16), (18, 14, 23), 25
Вариант 1	Машина 6: (1, 5, 3, 19), 15, 21, 24, (2, 6, 16), 9, (13, 20), (14, 23), 25, 17, 18, 22
Вариант 1	Машина 7: (5, 3), 21, (4, 12, 10), 9, 25, 22
Вариант 1	Машина 8: (1, 19), 15, 24, (2, 16), (13, 20), (14, 23), 17, 18
Вариант 1	Машина 9: 11, (5, 1, 3, 19), 15, 21, 24, (6, 2), 10, 16, 9, (13, 20), (14, 23), 25, 17, 18, 22

Рис. 9.3 Результаты работы программы на листе 1

Коэффициент плановой загрузки: 0,69
Группа 1: 0,71
Группа 2: 0,58
Группа 3: 0,81
Группа 4: 0,7
Группа 5: 0,81
Рекомендуемые варианты: по методу Сэвиджа - вариант 1, по методу Гурвица - вариант 1
Показатели вариантов расписания:
относительные затраты на наладку набора работ $U$ ; средняя полезность заказов $V$ ;
коэффициент неравномерности загрузки $K_n$ ; коэффициент группирования $K_g$ ; коэффициент запаздывания $K_z$ ;
полная длительность выполнения $Сmax$ , среднее $T_c$ и наибольшее $Tmax$ запаздывания в календарных часах
Начальные значения критериев: $U = 0$ ; $V = -1,869$
Вариант 1: $U = 137,521$ ; $V = -0,297$ ; $K_n = 2$ ; $K_g = 2,05$ ; $K_z = 0,56$ ; $Сmax = 130$ ; $T_c = 15,2$ ; $Tmax = 69,5$

Рис. 9.4 Значения показателей расписания для различных вариантов

писание, в котором коэффициенты группирования для наиболее загруженных машин заметно выше, чем для остальных машин (рис. 9.3).

### 9.2.3 Анализ результатов планирования

На рис. 9.5 показано расписание для первого полученного варианта, составленное с учетом графика работы цеха. Например, на первой машине к 8 часам первого планового дня должна быть на 100% закончена работа 3 вида 1 (рис. 9.2). Программа запланировала для машины 1 в этот момент начало работы 19, что позволяет обойтись без переналадки, т.к. эта работа также относится в виду 1. В дальнейшем на машине 1 предусмотрено выполнение работы 12 вида 3 и группы работ 24 и 17 вида 4. Работа 20 начинается в конце второй смены первого рабочего дня, а затем продолжается в начале следующего рабочего дня. Выполнение исходного задания для машины 1 первой группы (первой операции) заканчивается в течение второго планового дня. Остальные операции продолжатся также и после выходных дней.

Программа позволяет отследить последовательность выполнения операций для всех работ (рис. 9.6).

В данном случае две работы должны быть выполнены до введения в действие плана на рис. 9.6: для работы 7 заканчивается пятая операция на машине 9, а работа 8 вообще не предусматривает пятой операции, т.к. трудоемкость на машине 9 равна -1 (рис. 9.2), и для нее последней является операция 4 на машине 7.

Если какая-либо из работ оказывается запланированной заметно позже необходимого срока, для более раннего начала можно воспользоваться увеличенным весовым коэффициентом. В данном примере такой весовой коэффициент используется для работ 1, 2 и 9 (рис. 9.2).

Система обеспечивает вывод расписания работы машин в виде диаграммы Ганта (рис. 9.7). Из диаграммы наглядно видно, как происходит группирование, например, работы вида 1 закрашены черным цветом, вида 2 – закрашены коричневым цветом, вида 3 – синим цветом. Диаграмма Ганта хорошо иллюстрирует влияние трудоемкости работ на последовательность их выполнения. Горизонтальный размер прямоугольника, описывающего каждую работу, соответствует длительности ее непосредственного выполнения.

Для загрузки персонала существенное значение имеет плотность выполнения работ. При высокой плотности работы на машине могут выполняться за небольшой интервал времени, что дает возможность частично высвободить персонал. Например, в данном случае наибольшая плотность, равная 0,93, имеет место на машине 5; наибольшие потери рабочего времени наблюдаются на машине 8, где плотность выполнения составляет 0,49.

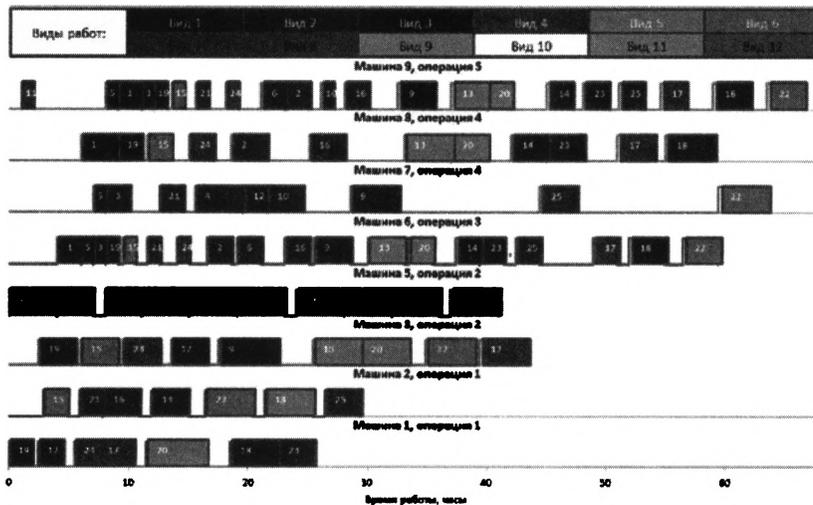
Машина 1:	8 (19) 10; 10,5 (12) 12,5; 13,5 (24) 15,5; 15,5 (17) 18,5; 19,5 (20) 32,5; 34,5 (18) 38,5; 38,5 (23) 41,5;
Машина 2:	10,9 (15) 12,9; 13,9 (21) 15,9; 15,9 (16) 18,9; 19,9 (14) 22,9; 32,4 (22) 36,4; 37,4 (13) 41,4; 42,4 (25) 45,4;
Машина 3:	10,5 (19) 13,5; 14 (15) 17; 17,5 (24) 20,5; 21,5 (12) 32,5; 33,5 (9) 38,5; 41,4 (13) 45,4; 45,4 (20) 81,4; 82,9 (22) 86,9; 87,4 (17) 91,4;
Машина 5:	8 (1) 12; 12 (3) 15; 16 (21) 19; 19 (2) 23; 23 (6) 35; 35 (16) 39; 40 (18) 44; 44 (14) 48; 80 (23) 84; 85 (25) 89;
Машина 6:	12 (1) 14; 14 (5) 15; 15 (3) 16; 16 (19) 17; 17,5 (15) 18,5; 19,5 (21) 20,5; 22 (24) 23; 32,5 (2) 34,5; 35 (6) 37; 39 (16) 41;
	41,5 (9) 44,5; 46 (13) 81; 81,4 (20) 83,4; 85,4 (14) 87,4; 87,4 (23) 89,4; 90,4 (25) 92,4; 104,9 (17) 106,9; 107,9 (18) 110,9; 112,4 (22) 115,4;
Машина 7:	15 (5) 16; 16 (3) 18; 20,5 (21) 22,5; 23,5 (4) 35,5; 35,5 (12) 37,5; 37,5 (10) 40,5; 44,5 (9) 80,5; 92,4 (25) 95,4; 115,4 (22) 119,4;
Машина 8:	14 (1) 17; 17 (19) 19; 19,5 (15) 21,5; 23 (24) 33; 34,5 (2) 37,5; 41 (16) 44; 81 (13) 86; 86 (20) 88; 90 (14) 93; 93 (23) 96;
	106,9 (17) 109,9; 110,9 (18) 114,9;
Машина 9:	9 (11) 10; 16 (5) 17; 17 (1) 19; 19 (3) 20; 20 (19) 21; 21,5 (15) 22,5; 23,5 (21) 32,5; 34 (24) 35; 37 (6) 39; 39 (2) 41; 42 (10) 43;
	44 (16) 46; 80,5 (9) 83,5; 85 (13) 88; 88 (20) 90; 93 (14) 95; 96 (23) 106; 107 (25) 109; 110,5 (17) 112,5; 114,9 (18) 117,9; 119,4 (22) 130,4;

Рис. 9.5 План загрузки машин

**План обработки по варианту 1**

Работа 1: 8 (5) 12; 12 (6) 14; 14 (8) 17; 17 (9) 19;  
 Работа 2: 19 (5) 23; 32,5 (6) 34,5; 34,5 (8) 37,5; 39 (9) 41;  
 Работа 3: 12 (5) 15; 15 (6) 16; 16 (7) 18; 19 (9) 20;  
 Работа 4: 23,5 (7) 35,5;  
 Работа 5: 14 (6) 15; 15 (7) 16; 16 (9) 17;  
 Работа 6: 23 (5) 35; 35 (6) 37; 37 (9) 39;  
 Работа 7:  
 Работа 8:  
 Работа 9: 33,5 (3) 38,5; 41,5 (6) 44,5; 44,5 (7) 80,5; 80,5 (9) 83,5;  
 Работа 10: 37,5 (7) 40,5; 42 (9) 43;  
 Работа 11: 9 (9) 10;  
 Работа 12: 10,5 (1) 12,5; 21,5 (3) 32,5; 35,5 (7) 37,5;  
 Работа 13: 37,4 (2) 41,4; 41,4 (3) 45,4; 46 (6) 81; 81 (8) 85; 85 (9) 88;  
 Работа 14: 19,9 (2) 22,9; 44 (5) 48; 85,4 (6) 87,4; 90 (8) 93; 93 (9) 95;  
 Работа 15: 10,9 (2) 12,9; 14 (3) 17; 17,5 (6) 18,5; 19,5 (8) 21,5; 21,5 (9) 22,5;  
 Работа 16: 15,9 (2) 18,9; 35 (5) 39; 39 (6) 41; 41 (8) 44; 44 (9) 46;  
 Работа 17: 15,5 (1) 18,5; 87,4 (3) 91,4; 104,9 (6) 106,9; 106,9 (8) 109,9; 110,5 (9) 112,5;  
 Работа 18: 34,5 (1) 38,5; 40 (5) 44; 107,9 (6) 110,9; 110,9 (8) 114,9; 114,9 (9) 117,9;  
 Работа 19: 8 (1) 10; 10,5 (3) 13,5; 16 (6) 17; 17 (8) 19; 20 (9) 21;  
 Работа 20: 19,5 (1) 32,5; 45,4 (3) 81,4; 81,4 (6) 83,4; 85 (8) 88; 88 (9) 90;  
 Работа 21: 13,9 (2) 15,9; 16 (5) 19; 19,5 (6) 20,5; 20,5 (7) 22,5; 23,5 (9) 32,5;  
 Работа 22: 32,4 (2) 36,4; 82,9 (3) 86,9; 112,4 (6) 115,4; 115,4 (7) 119,4; 119,4 (9) 130,4;  
 Работа 23: 38,5 (1) 41,5; 80 (5) 84; 87,4 (6) 89,4; 93 (8) 96; 96 (9) 106;  
 Работа 24: 13,5 (1) 15,5; 17,5 (3) 20,5; 22 (6) 23; 23 (8) 33; 34 (9) 35;  
 Работа 25: 42,4 (2) 45,4; 85 (5) 89; 90,4 (6) 92,4; 92,4 (7) 95,4; 107 (9) 109;

**Рис. 9.6** План обработки



**Рис. 9.7** Диаграмма Ганта

## 9.2.4 Листинг основной части программы

Как и в предыдущей главе, на каждом уровне построения дерева расписания используются 6 основных массивов:  $UStage()$ ,  $VStage()$ ,  $ParStage()$ ,  $CompStage()$ ,  $NPStage()$ ,  $Tk()$ , которые имеют назначение, совпадающее с назначением аналогичных массивов в главе 5. Поскольку для каждой операции могут применяться несколько параллельных машин, приходится использовать дополнительный массив  $FStage()$ . Соответственно для дальнейшего построения ветвей дерева путем перезаписи значений параметров недоминируемых узлов используются массивы  $U()$ ,  $V()$ ,  $Par()$ ,  $Comp()$ ,  $NP()$ ,  $Commen()$ ,  $FComp()$ . Программа автоматически переносит данные с листа в переменные и массивы.

В начале планирования для каждой из работ программа определяет, на какой операции и какой машине эта работа находится, и создает соответствующие отметки (рис. 9.8). После этого определяются трудоемкость первой оставшейся операции  $pav(i)$  и трудоемкость последующих оставшихся операций  $pavs(i)$ , а также необходимый момент запуска  $gs(i)$  (рис. 9.9).

Параметры первой необходимой операции  $pav(i)$  и трудоемкость последующих оставшихся операций  $pavs(i)$  играют важную роль при определении полезности массива невыполненных работ в текущем узле с помощью функции  $VZak()$  (рис. 9.10). Входными значениями функции являются количество работ  $inBeta$ , номер текущей работы  $ink$ , номер текущей машины  $inM$ , момент окончания работы машины  $snCl$ , момент начала выполнения работы  $snTk$  и момент окончания работы  $snFk$ . Большинство параметров на рис. 9.10 совпадают со значениями на рис. 4.4.

После подготовки исходных массивов рассчитываются значения исходных значений критериев в корне дерева. Величина относительных затрат в корне  $U_0 = 0$ , функция полезности заказов  $\bar{V}_0$  определяется с помощью функций  $Napr2()$  и  $Napr1()$ . Расчет основных параметров узлов первого уровня по всему количеству заказов производится в двойном цикле: внешний цикл осуществляется по работам, а внутренний цикл – по включенным машинам (рис. 9.11). Затем производится отсечение узлов по критериям и перенос в полные массивы недоминируемых узлов дерева решений.

На последующих уровнях  $intY$  построения дерева решений все этапы программы первого уровня повторяются с существенными изменениями. В каждом узле ветвления  $intZ$  запоминается расчетная полезность в созданном узле  $sngVz$ , номер машины в узле  $intMz$ , фиктивной расчетной длительности в узле  $sngCz$ . Кроме этого, для каждой машины  $i$  определяется текущая выполняемая работа  $PMach(i)$  и ее момент окончания  $Cl(i)$ , а для каждой работы с

```

For i = 1 To Beta      'по всем работам'
  Osm(i) = 0          'Отметка нахождения в производстве в момент планирования'
  For J = 1 To NMach 'по всем машинам
    If Order0(J) = des(i) Then 'для выполняемой работы
      If CO(J) = 100 Then 'если операция закончена
        Ek(i) = MachG(J) 'запись номера законченной операции совпадает с номером группы машин
      Else
        Osm(i) = 1 'отметка нахождения в производстве
      End If
      J = NMach 'окончание цикла
    End If
  Next J
  aJ(i) = 1 'отметка невыполненной работы
Next i

```

Рис. 9.8 Отметки начального выполнения работ по операциям

```

.....
For i = 1 To Beta          'цикл по работам'
  rav(i) = 0              ' трудоемкость первой оставшейся операции
  ravs(i) = 0            ' трудоемкость последующих оставшихся операций
  For J = 1 To NOper      'цикл по операциям
    If Ek(i) + Osm(i) < J Then 'для оставшихся операций
      m = 0              'количество включенных машин на операции
      Ekes = 0
      For k = 1 To NMach 'по всем машинам
        If MchAM(k) = 1 And MchG(k) = J And p(i, k) > 0 Then
          'для включенной машины, текущей операции и при ненулевой трудоемкости
          Ekes = Ekes + p(i, k) 'накопление сумм необходимой трудоемкости для всех машин
          m = m + 1 'возможное количество машин на операции
        End If
      Next k
      If Ek(i) + Osm(i) + 1 = J Then 'если текущая операция первая к исполнению
        If m > 0 Then 'если количество возможных машин на операции больше нуля
          rav(i) = rav(i) + Ekes / m 'добавление средней трудоемкости первой оставшейся операции
        Else 'не указаны необходимые машины
          Ek(i) = Ek(i) + 1 'ближайшая операция не нужна
        End If
      Else 'текущая операция не первая к исполнению
        If m > 0 Then 'если количество возможных машин на операции больше нуля
          ravs(i) = ravs(i) + Ekes / m 'добавление средней трудоемкости на других оставшихся операциях
        End If
      End If
    Next J
    ds(i) = dd(i) - rav(i) - ravs(i) ' Необходимый момент запуска
    If Cells(1, "Y").Value = 1 And d(i) <= NOpG Then
      'если при моделировании срок выполнения работы в календарных часах меньше горизонта планирования
      Tr = Tr + rav(i) + ravs(i) ' накопленная трудоемкость на горизонте планирования
      GOpG = GOpG + (NOpG - Ek(i)) 'накопленные операции на горизонте планирования
    End If
  Next i
text 1

```

Рис. 9.9 Расчет остающейся трудоемкости

```

Function VZak(inBeta, ink, inM, snCl, snTk, snFk)
  Dim snFav As Single
  Dim snComp As Single
  VZak = 0
  For i = 1 To inBeta
    snFav = rav(i) + ravs(i) ' суммарная длительность операции одной работы
    snComp = d(i) - ravs(i) 'требуемый момент окончания первой необходимой операции текущей работы
    If i = ink Then 'для выполняемой работы
      VZak = VZak + Vbor(aJ(i), W(i), p(ink, inM), p(ink, inM), snComp, snCl, snTk, snFk)
      'вклад выполняемой операции
      VZak = VZak + Vbor(1, W(i), ravs(i), p(ink, inM), snComp, snCl, snTk, snFk)
      'вклад остальных операций выполняемой работы
    Else
      VZak = VZak + Vbor(aJ(i), W(i), snFav, p(ink, inM), snComp, snCl, snTk, snFk)
      'вклад невыполняемых работ
    End If
  Next i
End Function

```

Рис. 9.10 Функция полезности заказов

```

For i = 1 To Beta 'цикл по строкам работ'
If Ek(i) < Noper And (Cells(i, "Y").Value = 0 Or (Cells(i, "Y").Value = 1 And d(i) <= Bgor)) Then
'для незаконченных работ, как без моделирования, так и при моделировании с установленным горизонтом
aJ(i) = 0.5 'строится узел первого уровня с i-ой выполняемой работой'
For J = 1 To Mmach
If MetkaM(J) = 1 And Ek(i) + Otm(i) + 1 = MchbG(J) And p(i, J) > 0 Then
'для включенных машин необходимой группы и необходимой операций'
n = n + 1 'номер текущего узла первого уровня'
If OrderO(J) > 0 Then 'если машина настроена на какой-то заказ
m = DetekM(Beta, OrderO(J)) 'номер строки в списке заказов
Else
m = 1 'первая строка в списке
End If
UStage(n) = Uzak(i, m, J) 'затраты на наладку'
Tk(n) = Calend(Cl(J), s(Vid(i), Vid(m), J), J, 1)
'начало деталирования равно моменту освобождения машины плюс время наладки'
If RD(i) > Tk(n) Then 'если момент поступления работы позже момента освобождения машин
Tk(n) = RD(i)
End If
CompStage(n) = Calend(Tk(n), p(i, J), J, 2) 'момент окончания работы в календарных часах
If CompStage(n) = 0 Then 'если не определен момент окончания работы
MagBox = 'недостаточен рабочий горизонт'
Exit Sub
End If
VStage(n) = (V0 * Cl(J) + VZak(Beta, i, J, Cl(J), Tk(n), CompStage(n))) / CompStage(n)
'полезность набора работ
MachStage(n) = J
ParStage(n) = 0
NPStage(n) = 1
End If
Next J
aJ(i) = 1 'возврат метки работы на невыполнение'
End If
Next i

```

Рис. 9.11 Расчет параметров узлов первого уровня

номером  $NP(k)$  определяется номер последней операции  $POper(NP(k))$  и ее момент окончания последней операции  $COper(NP(k))$ .

После этого в текущем узле по каждой работе  $i$  определяются трудоемкости первой следующей  $pav(i)$  и остальных операций  $pavs(i)$  (рис. 9.12). Наличие этих параметров позволяет определить значения функции  $VZak()$  во всех узлах. Остальные параметры для узлов последующих уровней определяются аналогично параметрам первого уровня. Отсечение узлов по критериям и перенос в полные массивы недоминируемых узлов дерева решений также производится аналогично узлам первого уровня.

После окончания построения дерева решений, как и в предыдущей главе, определяется область расположения вариантов решения на листе и производится сортировка вариантов по убыванию массива  $V()$  критерия полезности. Для полученного набора вариантов проводится поиск наиболее целесообразного варианта методами Сэвиджа и Гурвица, и также рассчитываются его показатели аналогично их определению в главе 8. Кроме того, для каждой машины определяется плотность загрузки (рис. 9.13). Для этого в массивах  $Cl(J)$  и  $FStage(J)$  накапливаются значения моментов начала и полного окончания работы машин, а также полная трудоемкость всех операций на каждой машине. Коэффициент  $KWip(J)$  плотности определяется как частное от деления полной трудоемкости на интервал работы каждой машины в рабочих часах.

```

For i = 1 To Beta
  For J = 1 To NOper          'цикл по операциям
    If POper(i) < J Then     'для оставшихся операций
      m = 0                  'количество включенных машин на операции
      Ehes = 0
      For k = 1 To NMach     'по всем машинам
        If MetkaM(k) = 1 And MachG(k) = J And p(i, k) > 0 Then
          'для включенной машины, текущей операции и при ненулевой трудоемкости
          Ehes = Ehes + p(i, k) 'накопление сумм необходимой трудоемкости для всех машин
          m = m + 1 'возможное количество машин на операции
        End If
      Next k
      If POper(i) + 1 = J Then 'если текущая операция первая к исполнению
        If m > 0 Then 'если количество возможных машин на операции больше нуля
          pav(i) = Ehes / m 'средняя трудоемкость первой оставшейся операции
        Else 'не указаны необходимые машины
          POper(i) = POper(i) + 1 'ближайшая операция не нужна
        End If
      Else 'текущая операция не первая к исполнению
        If m > 0 Then 'если количество возможных машин на операции больше нуля
          pavs(i) = pavs(i) + Ehes / m
          'добавление средней трудоемкости на других оставшихся операциях
        End If
      End If
    End If
  Next J
Next i

```

Рис. 9.12 Определение трудоемкостей  $pav(i)$  и  $pavs(i)$ 

```

For l = 1 To intY - 1      'наполнение строк работ на каждой машине для текущего варианта'
  For J = 1 To NMach
    If MachStage(l) = J Then 'если в узле l работает текущая машина J
      If Cl(J) = 0 Then
        Cl(J) = Tk(l) 'запоминание начала работы'
      End If
      If Tk(l) < Cl(J) Then
        Cl(J) = Tk(l) 'запоминание начала работы'
      End If
      If FStage(J) < CompStage(l) Then
        FStage(J) = CompStage(l) 'окончание работы текущей машины для всего набора работ
      End If
      KWip(J) = KWip(J) + p(NPStage(l), J) 'накопление трудоемкости на каждой машине'
      J = NMach
    End If
  Next J
Next l
For J = 1 To NMach
  If MetkaM(J) = 1 Then
    q = q + 1                  'очередная строка варианта'
    If FStage(J) > 0 Then
      KWip(J) = Round(KWip(J) / (WorkHours(FStage(J)) - WorkHours(Cl(J))), 2)
      'расчет плотности загрузки каждой машины'
    Else
      KWip(J) = 0
    End If
    Result(J) = "Машина " & J & ": " & CStr(KWip(J))
    Cells(Alfa + q, Gamma + 1).Value = Result(J)
  End If
Next J

```

Рис. 9.13 Расчет плотности загрузки машин

## 9.2.5 Перепланирование расписания

Рассмотрим пример перепланирования задания, первоначально имеющего вид, приведенный на листе 1 в книге MBook7.xls. Как было указано в п. 9.2.1. задание на 15.09.16 8:00 состоит из 25 работ шести видов. В случае, показанном на календарном графике, в течение первого и второго рабочего дня планируются две 8-часовые рабочие смены. Следующий календарный день выходной, после которого опять планируется двухсменная работа.

Поскольку продолжительность первого рабочего дня в данном случае составляет 16 часов, при работе в точном соответствии с расписанием, в течение дня (до момента 24 часа) на первой машине, например, должны быть полностью выполнены работы 19, 12, 24 и 17 и начата работа 20 (рис. 9.5). Аналогичная ситуация имеет место и на других машинах. Положим, что к моменту окончания первого рабочего дня появилась срочная работа 26 вида 3 с требованием немедленного выполнения. В такой ситуации требуется перепланирование расписания, начиная со следующего рабочего дня.

Обозначение (№ работы)	Требуемый календарный день и после начала	Ожидаемый календарный день поступления после начала	Вид работы	Весовой коэффициент	Отметка последней законченной операции
1	-1	0	1	5	5
2	0	0	2	3	2
3	0,5	0	1	5	5
4	1	0	3	3	3
5	1	0	1	5	5
6	1	1	2	1	1
7	1	0	5	1	5
8	1	0	5	1	5
9	1	0	1	5	1
10	2	0	3	1	3
11	2	0	4	1	5
12	3	0	3	1	1
13	3	0	5	1	0
14	3	0	3	1	1
15	3	0	6	1	5
16	3	0	2	1	1
17	3	0	4	1	1
18	3	0	3	1	0
19	3	0	1	1	5
20	3	0	5	1	0
21	4	0	2	1	4
22	4	1	6	1	0
23	4	0	3	1	0
24	4	0	4	1	3
25	4	2	2	1	0
26	0	0	3	5	0

Рис. 9.14 Состояние выполнения исходного задания на начало второго дня

Для корректировки расписания скопируем лист 1 на лист 2, очистим этот лист от результатов предыдущего расчета, введем отметки последних выполненных операций на момент начала нового планирования, а также запишем строку 26 нового задания (рис. 9.14). Как видно из рис. 9.14, для нескольких работ (1, 3, 5, 7, 8, 11, 15 и 19) выполнены все необходимые операции, и они должны быть исключены из расписания.

Для подготовки нового расписания в таблице состояния машин необходимо указать дату этого нового состояния. Кроме того, для каждой машины необходимо указать загруженную работу и ожидаемый процент ее выполнения на момент начала нового рабочего дня. Для проведения подготовки к перепланированию необходимо сдвинуть календарный график на единицу влево. Затем необходимо указать на использование режима перепланирования и ввести данные о дате перепланирования и границах пересчета исходного задания (аналогично, например, п. 5.7). При пересчете строки законченных работ автоматически удаляются, а даты уменьшаются на одни сутки.

После подготовки к перепланированию, следует провести новый расчет расписания. При вводе данных обязательно необходимо откорректировать границы исходных работ. В данном примере система предлагает 3 не доминируемых варианта, результат расчета иллюстрируется графиком Ганта.

Сравним откорректированный план по состоянию на 16.09.16 с остатком плана, составленного в предыдущий день (рис. 9.15). Прежде всего, в новом расписании приоритетной является новая срочная работа 26. Нагрузка на машины 1 и 2 для первой операции автоматически выровнялась: на каждой машине запланировано по 3 работы. План для машин 3 и 5 второй операции существенно изменился: введение новой работы 26 привело к перегруппированию работ и переносу некоторых работ с одной машины на другую. Для машин с последующими операциями изменения имеют незначительный характер.

<b>Новый план от 16.09</b>	
Вариант 1 Машина 1:	25, (18, 23)
Вариант 1 Машина 2:	26, 22, 13
Вариант 1 Машина 3:	(26, 14, 18, 23), (13, 20)
Вариант 1 Машина 5:	9, (16, 25), 17, 22
Вариант 1 Машина 6:	2, 26, 9, (6, 16), (14, 18, 23), 17, (20, 13), 25, 22
Вариант 1 Машина 7:	9, (12, 14, 18), 13
Вариант 1 Машина 8:	26, 2, 10, 16, 23, 17, 20, 25, 22
Вариант 1 Машина 9:	24, 26, (2, 6), 10, 9, 16, (14, 23), 17, (20, 13), 25, 18, 22
<b>Старый план (остаток от 15.09)</b>	
Вариант 1 Машина 1:	(18, 23)
Вариант 1 Машина 2:	22, 13, 25
Вариант 1 Машина 3:	9, (13, 20), 22, 17
Вариант 1 Машина 5:	(2, 6, 16), (18, 14, 23), 25
Вариант 1 Машина 6:	(2, 6, 16), 9, (13, 20), (14, 23), 25, 17, 18, 22
Вариант 1 Машина 7:	(4, 12, 10), 9, 25, 22
Вариант 1 Машина 8:	24, (2, 16), (13, 20), (14, 23), 17, 18
Вариант 1 Машина 9:	21, 24, (6, 2), 10, 16, 9, (13, 20), (14, 23), 25, 17, 18, 22

**Рис. 9.15** Сравнение откорректированного плана с предыдущим планом

## 9.2.6 Моделирование расписания

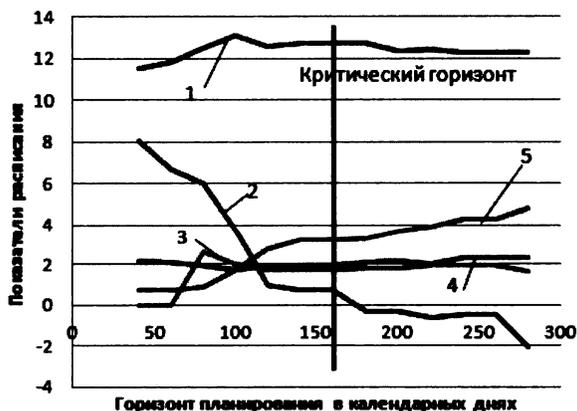
На листе 3 представлены варианты расчетов расписаний при различных значениях ограничителей ветвления. При увеличении значений ограничений  $B1$ ,  $B2$  и уменьшении  $B3$  пучок возможных ветвей дерева расширяется, что приводит к большому значению количества узлов на каждом уровне построения дерева. При  $B1 = 100$ ,  $B2 = 5$  и  $B3 = 0,01$  количество вариантов равно 1, а длительность решения составляет 21 сек., при  $B1 = 100$ ,  $B2 = 7$  и  $B3 = 0,01$  длительность решения увеличивается до 46 сек.

Моделирование позволяет улучшить первоначальное решение. Если на первом шаге коэффициент запаздывания  $Kz$  равен 0,6, то на третьем шаге он снижается до 0,52. Улучшение показателей может произойти благодаря некоторому увеличению психологического коэффициента. В данном случае, при величине  $\alpha = 0,15$  наблюдается снижение коэффициента запаздывания до 0,48 даже при  $B1 = 64$ ,  $B2 = 5$  и  $B3 = 0,02$ .

На листе 4 приведен пример для моделирования расписаний, содержащий 75 работ при трехсменной работе. Расчет этого примера приводит к одному варианту, в котором эффект группирования очень значителен: коэффициент группирования  $Kg$  равен 2,34, т.е. количество технологических партий примерно в 2,5 раза меньше, чем общее число выполняемых операций.

На листе 5 определяется рациональный горизонт планирования при большом числе работ. На рис. 9.16 приведены графики изменения показателей расписания в зависимости от планового горизонта.

В данном случае большинство показателей стабилизируются в области 150 часов, а полезность набора работ с дальнейшим увеличением горизонта продолжает снижаться. Поэтому целесообразно этот горизонт принять в качестве критического.



**Рис. 9.16** Параметры расписаний для разных горизонтов: 1 – приведенные затраты переналадок за один рабочий день; 2 – полезность выполняемого набора работ; 3 – коэффициент неравномерности загрузки; 4 – коэффициент группирования; 5 – коэффициент запаздывания, умноженный на 10

### 9.3 Расписания для гибких линий с ограниченными размерами партий

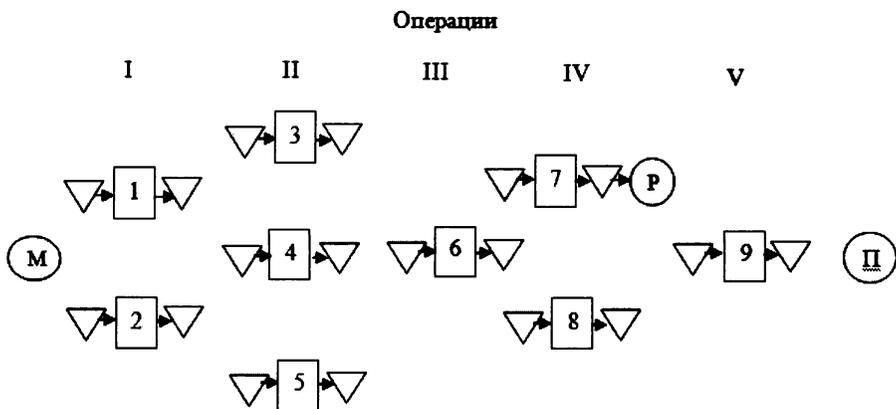
В предыдущем параграфе рассмотрен случай, когда вся работа (партия) по окончании одной операции целиком передается с этой операции на последующую. Во многих случаях физический объем заказанной работы превышает объем загрузочного устройства машины; кроме того, к моменту запуска работы последняя далеко не всегда полностью обеспечивается необходимым материалом. Поэтому такая работа может быть выполнена только в несколько партий запуска, причем количество этих партий на разных стадиях обработки может быть различным. Более того, даже на одной операции какой-то конкретной работы размеры партий могут быть различны для различных машин.

Передача партий с одной операции на другую в поточной линии обычно механизмуется при помощи специальных транспортных устройств. Устройства такого рода могут быть стационарными – для передачи между конкретными машинами, и движущимися – для передачи между любыми машинами. В настоящей работе рассматривается последний случай, в котором такое транспортное устройство будем именовать роботом.

Робот, разумеется, должен быть снабжен транспортной емкостью некоторого объема и устройством, обеспечивающим загрузку этой емкости и ее выгрузку на машины. Допустим, что время перемещения робота между машинами и время загрузки-выгрузки транспортной емкости намного меньше, чем время обработки загруженной партии на любой машине. В этом случае вся поточная линия может обслуживаться одним роботом, который последовательно будет обходить машины линии и перегружать обрабатываемые партии с выполненной операции на последующую (рис. 9.17).

На рис. 9.17 приведен пример структуры разветвляющейся (гибридной) поточной линии, на которой последовательно выполняются 5 операций. Линия состоит из девяти машин, причем для первой и четвертой операции предназначены по две машины, для второй операции – 3 машины, а на третьей и пятой операции используются по одной машине. Каждая машина оснащена входным и выходным буферами ограниченной емкости.

Исходные заготовки со склада М могут быть с помощью робота поданы на одну из машин первой операции; затем после каждой операции очередная партия может быть транспортирована



**Рис. 9.17** Пример гибкой поточной линии с буферами ограниченной емкости

роботом на одну из машин следующей операции. На рис. 9.17 показан случай, когда робот  $P$  находится в состоянии загрузки из выходного буфера машины 7, выполняющей операцию 4. Очевидно, что последующее движение робота возможно только в направлении входного буфера машины 9, которая является единственной машиной на операции 5. После выполнения последней операции на машине 9 обработанная партия переносится роботом на склад готовой продукции  $\Pi$  с неограниченной емкостью.

Будем полагать, что для переноса новой партии на машину для обработки при помощи робота необходимо, чтобы входной буфер этой машины был пуст. Если выходной буфер машины также пуст, то на эту машину можно загружать любую работу. В случае, если в выходном буфере имеются обработанные детали, на загрузку входного буфера накладывается определенное ограничение.

После переноса транспортной партии на машину, она может запускаться, если есть свободное место в ее выходном буфере. В том случае, когда во входном буфере машины, с которой выгружается транспортная партия, имеются необработанные детали, эта машина также запускается. Каждая машина будет работать до тех пор, пока либо заполнится ее выходной буфер, либо закончатся заготовки во входном буфере. Назовем такой временной интервал работы каждой машины ее очередным циклом.

Поставленная задача может быть записана согласно классификации теории расписаний как

$$FF, R1|pmtn, r_{jq}, d_i, s_{jom}, B_m|U, \bar{V}. \quad (9.2)$$

Формула 9.2 по сравнению с формулой 9.1 имеет несколько отличий. В первом поле формулы, кроме задания типа производства  $FF$ , указывается количество транспортных средств  $R$  в линии – в данном случае такое средство (робот) одно.

Во втором поле, как и в предыдущем параграфе, указываются требуемые моменты выполнения заказов  $d_i$  и трудоемкости переналадки  $s_{jom}$ . Параметр  $pmtn$  показывает, что в отличие от предыдущего случая, обработка на машинах может производиться с прерываниями и в партиях, в общем случае не равными размерам заказов. Более того, размер обрабатываемой партии на каждом цикле работы конкретной машины не всегда равен размеру транспортной партии, подаваемой на эту машину. В качестве плановых поступлений используются не однократные моменты поступления работ (заготовок) в цех  $r_i$ , а многократные моменты  $q$  поступления материалов  $r_{jq}$  различных типов  $j$ . Параметр  $B_m$  указывает на наличие входного и выходного буферов ограниченной емкости на  $m$ -ой машине.

В отличие от задачи, рассмотренной в предыдущем параграфе, для узлов, соответствующих первой операции, существует ограничение по наличию материала

$$Stock(j) = \sum_q^{sngCz} r_{jq} - Distr(j) > 0, \quad (9.3)$$

где  $Stock(j)$  – текущий запас материала  $j$ ;  $sngCz$  – момент освобождения машины для первой операции;  $Distr(j)$  – суммарный расход материала на этот момент.

Кроме ограничения 9.3, здесь для построения узлов дерева необходимо учесть несколько условий, касающихся буферов машин. Прежде всего, возможность переноса заготовок из выходного буфера машины предыдущей операции во входной буфер машины для последующей операции зависит от текущего наполнения обоих этих буферов. Поэтому при построении узлов дерева в каждом узле необходимо фиксировать не только машину, на которой проводится соответствующая операция, но и машину, с которой переносится заготовки.

Для этой цели составляется полный список возможных пар машин  $u$ , которые должны обслуживаться роботом. При построении каждого узла дерева из этого списка отбираются пары машин, выполняются некоторые требования.

Обозначим для каждой возможной пары машин  $u$  текущее количество продукта  $b$  в буферах тремя индексами: первый индекс – номер пары машин, второй индекс со значением 1 или 2 обозначает первую или вторую машину в паре, третий индекс со значением 1 или 2 обозначает входной или выходной буфер машины. Склад материалов образует пары с машинами первой операции, а машины последней операции образуют пары со складом готовой продукции.

Будем полагать, что для переноса партии при помощи робота с первой машины в паре  $u$  на вторую машину необходимо, чтобы в выходном буфере первой машины были заготовки, а входной буфер второй машины был пуст, т.е.

$$b_{u12} > 0 \text{ и } b_{u21} = 0. \quad (9.4)$$

Если выходной буфер второй машины также пуст, т.е.  $b_{u22} = 0$ , то на эту машину можно загружать любую работу. В случае, если в выходном буфере имеются обработанные детали и  $b_{u22} > 0$ , на загрузку входного буфера накладывается определенное ограничение.

Здесь есть две возможности. В первом случае, возможна загрузка только еще одной партии того же заказа (работы), детали которого находятся в выходном буфере. Во втором случае допустима загрузка другого заказа, если вид его деталей совпадает с видом деталей в выходном буфере. Очевидно, что в первом случае детали различных заказов не будут смешиваться, и могут учитываться и храниться отдельно. В настоящей книге рассматривается именно этот вариант.

Количество продукта  $sngOst$  в паре  $u$  определяется имеющимся объемом продукта в выходном буфере первой машины, емкостью входного буфера второй машины  $B_{u21}$  и объемом транспортной емкости робота  $B_r$ :

$$sngOst = \text{Min}(b_{u12}, B_{u21}, B_r). \quad (9.5)$$

После переноса транспортной партии на вторую машину пары, эта машина может запускаться, если есть свободное место в ее выходном буфере, т.е.

$$b_{u22} < B_{u22}. \quad (9.6)$$

В том случае, когда во входном буфере первой машины, с которой выгружается транспортная партия, имеются необработанные заготовки, т.е.

$$b_{u11} > 0, \quad (9.7)$$

эта машина также запускается. Каждая машина будет работать до тех пор, пока либо заполнит ее выходной буфер, либо закончатся заготовки во входном буфере. Назовем такой временной интервал работы каждой машины ее машинным циклом.

### 9.3.1 Исходные данные задачи

Исходные данные для составления расписания записываются на листе MS Excel электронной книги MBook8.xls, состоящей из четырех листов. На листе 1 в табл. \$A\$5:\$G\$20 находится задание, состоящее из шестнадцати работ шести различных видов, которое приведено на рис. 9.18. Работы выполняются последовательно на пяти операциях, для чего в гибкой поточной линии установлены 9 машин.

В каждой строке задания описываются параметры работ: номер работы; требуемый момент день готовности; вид работы; количество штук в работе; весовой коэффициент работы; номер последней законченной операции и процент уже выполненной работы.

В табл. \$U\$4:\$AC\$13 (рис. 9.19) записаны данные каждой из машин, причем в данном случае одна из машин находится в выключенном состоянии. Каждая из машин предназначена для выполнения одной из операций технологического процесса и относится к соответствующей группе. По каждой работающей машине приведены данные о ее настройке на конкретную работу на момент планирования (начало нового рабочего дня), процент загрузки работы на машину и ожидаемый момент окончания обработки.

Если работа находится на машине и процент ее загрузки равен 100, то последней законченной операцией является предыдущая операция. Если процент работы, находящейся на машине, меньше 100, то для определения номера последней выполненной операции необходимо суммировать процент загрузки на разных машинах, а также процент уже выполненной работы. Номер последней законченной операции устанавливается по номеру операции, для которой обработка уже произведена.

Например, в данном случае работа 1 частично загружена на машину 9 для выполнения операции 5 и машину 8 для операции 4. Поэтому последней законченной операцией для работы

Обозначение (№ заказа)	Требуемый календарный день готовности после начала	Вид работы	Количество штук	Весовой коэффициент	Номер последней законченной операции	Процент полного выполнения
1	-1	3	70	1	3	0
2	1	2	30	3	0	0
3	2	1	40	1	1	0
4	3	3	80	1	0	50
5	4	1	40	1	0	0
6	4	2	50	1	1	0
7	5	3	30	1	3	0
8	5	1	25	1	0	0
9	6	1	30	1	0	0
10	6	3	60	1	0	0
11	6	4	70	1	0	0
12	7	3	90	1	0	0
13	7	5	20	1	0	0
14	8	3	40	1	0	0
15	8	6	50	1	0	0
16	8	2	70	1	0	0

Рис. 9.18 Исходное задание на листе 1

Состояние машин на Машина	15.09.16 8:00								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Номер группы машин	1	1	2	2	2	3	4	4	5
Физическая емкость входного буфера, л	20	30	25	30	32	25	25	25	25
Физическая емкость выходного буфера, л	30	30	25	30	35	30	25	35	25
Стоимость часа наладки машины	2	2,5	3,5	1,8	2,8	2,5	3,5	1,8	2,8
Отметка включения машины	1	1	1	0	1	1	1	1	1
Настройка в начале дня на работу	5	0	3	0	6	2	7	1	1
Процент загрузки работы на операции	100	0	100	0	100	50	100	30	70
Ожидаемый момент остановки операции, часы	8	8	9	0	8	9	8	8	8

Рис. 9.19 Начальная загрузка машин

1 является операция 3. Работа 2 загружена на машину 6 для выполнения операции 3 и больше не загружалась ни на какую другую машину. Поэтому номером ее последней законченной операцией является 0.

Работы 3 и 6 загружены на 100% на машины для операции 2, поэтому последней выполненной операцией для них является операция 1. Работа 7 загружена на 100% на операции 4, а работа 5 тоже на 100% на операции 1. Поэтому для работы 7 последним номером выполненной операции является 3, а для работы 5 этот номер равен 0. Работа 4 выполнена полностью на 50%, однако в дальнейшем больше не продолжалась, и для нее номер последней операции равен 0.

В табл. \$V\$20:\$BW\$25 приведены нормы времени в часах на переналадку с одного вида работы на другой для каждой из девяти машин. При этом, как и раньше, полагается, что номер предыдущего вида работы устанавливается по столбцу таблицы, а номер последующего вида работы – по строке таблицы. В табл. \$U\$35:\$AF\$40 записаны нормы объема в литрах для одной штуки каждой заготовки; нормы материала, расходуемого на одну деталь; нормы процессного времени обработки одной детали на каждой машине. В табл. \$X\$43:\$AZ\$50 приведен график ожидаемого поступления новых материалов и заготовок для всех видов работ.

В табл. \$X\$54:\$BH\$66 описан календарный график работы машины по дням, начинающийся с первого дня выполнения составляемого расписания. Для каждой смены календарного дня проставлено количество рабочих часов, для каждой машины указано плановое время проведения технического обслуживания. В приведенном примере предусмотрена двухсменная работа с двенадцатичасовым рабочим днем.

На листе 2 приведен возможный вариант перепланирования этого задания, на листе 3 проводится моделирование по различным параметрам, на листе 4 приведен пример моделирования с целью нахождения рационального горизонта планирования.

### 9.3.2 Работа с программой

Для работы с программой планирования в MS Excel устанавливается соответствующий рабочий лист, например, лист 1 и осуществляется запуск макроса. При выборе опции «без моделирования», система сообщает о последней дате планирования и предлагает одну из двух возможностей – подготовку планирования с новой датой или повторение расчета с последней датой.

В форме «Ввод данных» задаются основные параметры процесса. Система автоматически рассчитывает загрузку участка (по включенным машинам) и выдает соответствующее сообщение. По окончании расчета на лист выводятся коэффициенты загрузки по каждой группе

машин. Поскольку количество возможных вариантов решения в этой задаче обычно не больше двух, и часто вообще равно единице значения, показатели расписания не выводятся. Все возможные и не доминируемые варианты загрузки машин выводятся на лист (рис. 9.20).

В качестве примера рассмотрим расчет для задания на рис. 9.18, для чего в форме «Ввод данных» установим «Имя последней ячейки ввода данных» равное G20. Для каждой машины работы сгруппированы по видам, а группы разделены пробелами.

Для построения диаграмм необходимо задать горизонт просмотра. Если горизонт просмотра меньше интервала времени, необходимого для выполнения всех работ в задании, программа выведет на экран соответствующую часть операций, но зато на начальном участке времени диаграммы могут быть изучены более подробно.

Недоминируемые варианты в результате расчета	
Вариант 1	Машина 1: 8, (2, 16, 16, 16), 9, (15, 15, 15), 13
Вариант 1	Машина 2: (11, 11), (4, 14, 10, 10, 12, 12, 12, 12)
Вариант 1	Машина 3: (3, 5, 8, 9), (15, 15), (11, 11), (4, 4, 14, 10, 10, 12, 12, 12)
Вариант 1	Машина 5: (2, 16, 16), 13
Вариант 1	Машина 6: (2, 6), (3, 5, 8), 2, 9, (15, 15, 15), (11, 11, 11), (4, 4, 14, 10, 10, 10, 12, 12, 12, 12), (16, 16, 16), 13
Вариант 1	Машина 7: (4, 4, 4, 14, 14, 12, 12), 13
Вариант 1	Машина 8: (2, 6), (3, 5, 8), 2, 9, (15, 15, 15), (11, 11, 11), (10, 10, 10, 12), (16, 16)
Вариант 1	Машина 9: (1, 1, 7), (2, 6), (3, 5, 8), 2, 9, (15, 15, 15), 11, (4, 4), 11, (10, 10, 14, 14, 12, 12, 12, 12), 13, (16, 16, 16)

Рис. 9.20 План обрабатываемых партий на машинах

### 9.3.3 Анализ результатов планирования

На рис. 9.21 показано расписание для единственного найденного варианта, составленное с учетом графика работы цеха. Для каждой машинной операции, как обычно, указывается момент начала в календарных часах, номер работы (в скобках) и момент окончания операции.

Машина 1:	43,8 (8) 45,5; 45,6 (2) 48,6; 48,8 (16) 90,8; 90,9 (16) 94,9; 110,8 (16) 112,8; 120 (9) 122; 123,8 (15) 126,3; 126,4 (15) 127,7; 130,1 (15) 131,4; 132,4 (13) 134,1;
Машина 2:	110,9 (11) 115,1; 142,7 (11) 144,4; 144,6 (4) 148,6; 163,5 (14) 167,5; 172,5 (10) 176,8; 199 (10) 248,7; 252,7 (12) 257; 257,4 (12) 257,5; 257,6 (12) 261,2; 264,6 (12) 265,3; 265,4 (12) 266,8;
Машина 3:	8 (3) 9; 41,7 (5) 43,7; 45,6 (8) 46,8; 122,1 (9) 123,6; 130,1 (15) 132,2; 132,5 (15) 133,7; 142,7 (11) 149,7; 155,9 (11) 156; 166 (4) 160,2; 163,4 (4) 163,8; 168,2 (14) 172,3; 194,1 (14) 194,6; 199 (10) 251,2; 252,6 (10) 255,4; 257,4 (12) 261,6; 264,6 (12) 268,8; 269,3 (12) 269,4; 269,4 (12) 271,5;
Машина 5:	48,7 (2) 50,9; 110,8 (16) 119,8; 119,9 (16) 121,4; 310,8 (13) 312,2;
Машина 6:	8 (2) 9; 19 (6) 27,3; 36,8 (3) 41,5; 43,8 (5) 48,4; 100,1 (8) 103; 106,6 (2) 109,1; 126,5 (9) 130; 132,5 (15) 137,7; 132,5 (15) 137,7; 139,3 (15) 140,4; 140,5 (15) 142,6; 151,8 (11) 155,5; 155,9 (11) 158,8; 158,9 (11) 161,8; 163,3 (4) 168; 168,1 (4) 168,6; 194,1 (14) 198,8; 198,9 (14) 199,5; 252,5 (10) 257,3; 257,4 (10) 258,3; 259,4 (10) 260,6; 264,5 (12) 269,2; 269,3 (12) 270,2; 281,9 (12) 285,7; 285,8 (12) 286,7; 291 (12) 292,5; 302,3 (16) 310,7; 310,7 (16) 312,5; 312,5 (16) 314,2; 316,9 (13) 318,2;
Машина 7:	177 (4) 181,7; 184,2 (4) 184,3; 184,4 (4) 184,9; 198,6 (14) 252,3; 276,9 (14) 277,4; 281,9 (12) 286,6; 291 (12) 295,6; 318,3 (13) 319;
Машина 8:	16 (2) 17,2; 27,4 (6) 31,6; 41,6 (3) 46,9; 87,8 (5) 93,2; 103,1 (8) 106,4; 111 (2) 112,2; 130,1 (9) 134,1; 140,5 (15) 142; 142,6 (15) 143,3; 144,7 (15) 145; 158,9 (11) 163,1; 163,2 (11) 164,8; 177,1 (11) 178,2; 258,4 (10) 264,3; 284,4 (10) 288,7; 289,5 (10) 271,2; 292,6 (12) 295,6; 312,5 (16) 316,7; 316,8 (16) 318,5;
Машина 9:	8,1 (1) 9,6; 9,7 (1) 12,2; 12,3 (7) 15,8; 17,3 (2) 18,8; 31,7 (6) 36,7; 81 (3) 87,7; 93,2 (5) 99,9; 106,5 (8) 110,7; 122,2 (2) 123,7; 134,1 (9) 139,1; 144,7 (15) 151,5; 151,5 (15) 151,6; 151,7 (15) 155,7; 177,1 (11) 184; 184,2 (4) 188,4; 188,6 (4) 189,1; 189,2 (11) 193,9; 269,5 (10) 273,7; 273,9 (10) 276,7; 276,9 (14) 281; 281,2 (14) 281,7; 286,7 (12) 290,9; 295,7 (12) 297,8; 297,9 (12) 299,9; 300 (12) 302,2; 319 (13) 321,4; 321,5 (16) 326,5; 326,6 (16) 326,7; 326,7 (16) 328,7;

Рис. 9.21 План загрузки машин



План обработки по варианту 1

Работа 1: 8,1 (9 /19 /19) 9,6; 9,7 (9 /49 /49) 12,2; 12,2 (9 /0 /0) 12,2;

Работа 2: 16 (8 /50 /50) 17,2; 17,3 (9 /50 /50) 18,8; 18,9 (9 /0 /0) 18,9; 45,6 (1 /50 /50) 48,6; 48,7 (5 /50 /50) 50,9;  
106,6 (6 /50 /50) 109,1; 122,3 (8 /50 /50) 123,5; 124,9 (9 /50 /50) 126,4; 126,5 (9 /0 /0) 126,5;

Работа 3: 36,8 (6 /100 /100) 41,5; 41,6 (8 /100 /100) 46,9; 81 (9 /100 /100) 87,7; 87,7 (9 /0 /0) 87,7;

Работа 4: 156,7 (2 /50 /50) 160,7; 162,2 (3 /45 /45) 166,4; 167,6 (6 /45 /45) 172,4; 167,6 (3 /0 /0) 167,7; 167,8 (3 /5 /5) 168,2;  
172,5 (6 /50 /50) 173; 181,4 (7 /45 /45) 186,1; 188,6 (9 /45 /45) 192,8; 188,6 (7 /0 /0) 188,7; 188,8 (7 /5 /5) 189,3;  
192,9 (9 /0 /0) 192,9; 193 (9 /5 /5) 193,5; 193,5 (9 /0 /0) 193,5;

Работа 5: 41,7 (3 /100 /100) 43,7; 43,8 (6 /100 /100) 48,4; 87,8 (8 /100 /100) 93,2; 93,2 (9 /100 /100) 99,9; 100 (9 /0 /0) 100;

Работа 6: 19 (6 /100 /100) 27,3; 27,4 (8 /100 /100) 31,6; 31,7 (9 /100 /100) 36,7; 36,8 (9 /0 /0) 36,8;

Работа 7: 12,3 (9 /100 /100) 15,8; 15,9 (9 /0 /0) 15,9;

Работа 8: 43,8 (1 /100 /100) 45,5; 45,6 (3 /100 /100) 46,8; 100,1 (6 /100 /100) 103; 103,1 (8 /100 /100) 106,4;  
106,5 (9 /100 /100) 110,7; 110,7 (9 /0 /0) 110,7;

Работа 9: 120 (1 /100 /100) 122; 122,1 (3 /100 /100) 123,6; 126,6 (6 /100 /100) 130,1; 130,1 (8 /100 /100) 134,1;  
135,7 (9 /100 /100) 140,7; 140,7 (9 /0 /0) 140,7;

Работа 10: 176,9 (2 /71 /71) 181,2; 251,4 (3 /60 /60) 255,6; 251,4 (2 /40 /40) 253,1; 256,9 (6 /60 /60) 261,7; 257 (3 /40 /40) 259,8;  
261,8 (6 /100 /71) 262,7; 262,8 (8 /60 /60) 268,7; 262,8 (6 /40 /40) 265; 268,8 (8 /100 /83) 271,1; 273,9 (9 /60 /60) 278,1;  
273,9 (8 /40 /40) 275,6; 278,2 (9 /0 /0) 278,2; 278,3 (9 /40 /40) 281,1; 281,2 (9 /0 /0) 281,2;

Работа 11: 140,9 (2 /71 /71) 145,1; 145,2 (3 /60 /60) 152,2; 145,2 (2 /40 /40) 146,9; 156,5 (6 /60 /60) 162,1; 156,5 (3 /0 /0) 156,6;  
156,7 (3 /40 /40) 161,3; 162,2 (6 /100 /71) 163,2; 163,3 (8 /60 /60) 167,5; 163,3 (6 /40 /40) 166; 167,6 (8 /100 /83) 169,2;  
181,5 (9 /60 /60) 188,4; 181,5 (8 /40 /40) 182,6; 188,5 (9 /0 /0) 188,5; 193,6 (9 /40 /40) 198,3; 198,4 (9 /0 /0) 198,4;

Работа 12: 257,1 (2 /48 /48) 261,4; 261,8 (3 /40 /40) 266; 261,8 (2 /8 /8) 261,9; 262 (2 /56 /48) 265,6; 268,9 (6 /40 /40) 273,6;  
269 (3 /40 /40) 273,2; 269 (2 /16 /16) 269,7; 269,8 (2 /20 /20) 270,2; 273,7 (6 /80 /48) 274,6; 273,7 (3 /0 /0) 273,8;  
273,8 (3 /20 /20) 275,9; 286,3 (7 /40 /40) 291; 286,3 (6 /40 /40) 290,1; 290,2 (6 /60 /48) 291,1; 291,1 (9 /40 /40) 295,3;  
295,4 (9 /0 /0) 295,4; 295,4 (7 /40 /40) 300,2; 295,4 (6 /20 /20) 296,9; 297 (8 /20 /20) 300; 300,1 (9 /20 /20) 302,2;  
302,3 (9 /60 /40) 304,3; 304,4 (9 /20 /20) 306,6; 306,6 (9 /0 /0) 306,6;

Работа 13: 130,2 (1 /100 /100) 131,9; 315,2 (5 /100 /100) 316,6; 321,3 (6 /100 /100) 322,6; 322,7 (7 /100 /100) 323,4;  
323,4 (9 /100 /100) 325,8; 325,9 (9 /0 /0) 325,9;

Работа 14: 167,8 (2 /100 /100) 171,8; 172,6 (3 /89 /89) 176,7; 198,5 (6 /89 /89) 251,2; 198,5 (3 /11 /11) 199; 251,3 (6 /100 /100) 251,9;  
252 (7 /89 /89) 256,7; 281,3 (9 /89 /89) 285,4; 281,3 (7 /11 /11) 281,8; 285,6 (9 /11 /11) 286,1; 286,2 (9 /0 /0) 286,2;

Работа 15: 122,2 (1 /50 /50) 124,7; 124,8 (1 /100 /75) 126,1; 126,6 (3 /62 /62) 128,7; 126,6 (1 /38 /38) 127,9; 130,3 (6 /62 /62) 135,5;  
130,3 (3 /38 /38) 131,5; 135,6 (6 /100 /75) 136,7; 140,8 (8 /62 /62) 142,4; 140,8 (6 /38 /38) 142,9; 143 (8 /100 /87) 143,6;  
145,3 (9 /62 /62) 152,1; 145,3 (8 /38 /38) 145,6; 152,1 (9 /100 /62) 152,2; 152,3 (9 /38 /38) 156,3; 156,4 (9 /0 /0) 156,4;

Работа 16: 48,8 (1 /57 /57) 80,8; 80,9 (1 /100 /86) 84,9; 110,8 (5 /86 /86) 119,8; 110,8 (1 /14 /14) 112,6; 119,9 (5 /100 /100) 121,4;  
306,7 (6 /71 /71) 315,1; 315,1 (6 /100 /86) 316,9; 316,9 (8 /71 /71) 321,1; 316,9 (6 /29 /29) 318,6; 321,2 (8 /100 /100) 322,9;  
325,9 (9 /71 /71) 330,9; 331 (9 /100 /71) 331,1; 331,1 (9 /29 /29) 333,1; 333,2 (9 /0 /0) 333,2;

Рис. 9.24 План обработки

третьей смены второго рабочего дня, т.е. 56 часов (до 8 часов третьего календарного дня). Затем, после начала нового рабочего дня в 8 часов (80 календарных часов) машина 1 вновь запускается и в 80,8 часа остатки партии оказываются в выходном буфере. Поскольку емкость выходного буфера машины 1 составляет 30 литров, то после полной обработки загруженной партии в выходном буфере остается свободное место.

По плану робот немедленно берет со склада остающуюся часть работы 16 в количестве 47% и загружает это количество во входной буфер машины 1, в результате чего на машине 1 оказывается загруженными 100% работы 16.

После загрузки машина начинает работать и часть вновь загруженной партии переходит в выходной буфер. При полной загрузке выходного буфера в нем оказывается 86% всей работы 16. Дальнейшая работа машины 1 возможно только после хотя бы частичной разгрузки выходного буфера. В данном случае это происходит в момент 110,8, когда робот переносит все детали из выходного буфера машины 1 и составляющие 86% работы 16 на машину 5. После такого переноса машина 1 запускается в третий раз и обрабатывает остающиеся 14% работы 16.

На рис. 9.25 перечислены шаги работа, переносащего партии деталей с машины на машину. Рассмотрим составленное расписание, начиная с первых шагов работа. В плане перемещений

работа на рис. 9.25 на каждом шаге сначала указывается момент начала движения робота в календарных часах, затем (в скобках) номер машины, с которой робот снимает детали и (через дробь) номер машины, на которую робот эти детали загружает. Номер склада материалов (заготовок) считается равным 0, номер склада готовой продукции превышает на единицу наибольший номер машины в линии, и в данном случае равен 10. После номеров машин приводится номер переносимой работы.

На первом шаге в момент 8,1 робот переносит часть деталей работы 1, на которых завершилась обработка на последней операции, с машины 9 на склад 10. Полагается, что машина 9, на которые загружены 70% работы 1, в начальный момент 8 часов будет находиться в остановленном состоянии (рис. 9.19). Это произойдет, если либо будет полностью заполнен выходной буфер, либо закончатся заготовки во входном буфере.

В данном случае имеет место первый вариант, и после разгрузки выходного буфера роботом машина 9 в момент 8,1 начинает обработку деталей, находящихся во входном буфере (рис. 9.21). Обработка заканчивается в момент 9,6.

Переходя к плану обработки на рис. 9.24, видим, что в момент запуска машины 9 на ней от начальных 70% работы 1 осталось только 19%, т.к. 51% деталей, занимавшие объем 25 л выходного буфера, были перенесены роботом на склад. После остановки машины 9 в момент 9,6 эти 19% должны быть полностью обработаны и находиться в выходном буфере.

Следующий плановый шаг робота в момент 9,7 осуществляет перенос остатка работы 1 в количестве 30% с машины 8 (рис. 9.19) во входной буфер машины 9 для выполнения последней операции 5. Это количество обрабатывается и добавляется к готовым деталям в выходном буфере. В результате в момент 12,2 (рис. 9.24) остановки машины 9 в выходном буфере должно находиться 49% работы 1, которые затем переносятся на склад готовой продукции на третьем шаге робота, и в этот момент работа 1 окончательно освобождает машину 9.

Перемещения робота можно проследить графически. Например, на рис. 9.26 приведен график движения робота на горизонте 150 календарных часов, которые в данном случае соответствуют примерно ста часам непрерывной работы. Отрезки перемещений робота окрашены в различный цвет, соответствующий виду переносимых деталей. Например, на первом шаге с

Шаги робота						
8,1 (9/10) 1,	48,8 (0/1) 16;	126,5 (9/10) 2,	156,7 (2/3) 11,	193 (7/9) 4;	273,7 (3/6) 12;	306,7 (5/6) 16;
9,7 (8/9) 1;	80,9 (0/1) 16;	126,6 (3/6) 9;	156,7 (0/2) 4;	193,5 (9/10) 4;	273,8 (2/3) 12;	315,1 (5/6) 16;
12,2 (9/10) 1;	81 (8/9) 3;	126,6 (1/3) 15;	162,2 (3/6) 11;	193,6 (8/9) 11;	273,9 (8/9) 10;	315,2 (1/5) 13;
12,3 (7/9) 7;	87,7 (9/10) 3;	128,8 (1/3) 15;	162,2 (2/3) 4;	198,4 (9/10) 11;	278,2 (9/10) 10;	316,9 (6/8) 16;
15,9 (9/10) 7;	87,8 (6/8) 5;	130,1 (6/8) 9;	163,3 (6/8) 11;	198,5 (3/6) 14;	278,3 (8/9) 10;	321,2 (6/8) 16;
16 (6/8) 2;	93,2 (8/9) 5;	130,2 (0/1) 13;	167,6 (6/8) 11;	251,3 (3/6) 14;	281,2 (9/10) 10;	321,3 (5/6) 13;
17,3 (8/9) 2;	100 (9/10) 5;	130,3 (3/6) 15;	167,6 (3/6) 4;	251,4 (2/3) 10;	281,3 (7/9) 14;	322,7 (6/7) 13;
18,9 (9/10) 2;	100,1 (3/6) 8;	135,6 (3/6) 15;	167,8 (2/3) 4;	252 (6/7) 14;	285,5 (7/9) 14;	323,4 (7/9) 13;
19 (5/6) 6;	103,1 (6/8) 8;	135,7 (8/9) 9;	167,8 (0/2) 14;	256,8 (6/7) 14;	285,6 (9/10) 14;	325,9 (9/10) 13;
27,4 (6/8) 6;	106,5 (8/9) 8;	140,7 (9/10) 9;	172,5 (3/6) 4;	256,9 (3/6) 10;	286,2 (9/10) 14;	325,9 (8/9) 16;
31,7 (8/9) 6;	106,6 (5/6) 2;	140,8 (6/8) 15;	172,6 (2/3) 14;	257 (2/3) 10;	286,3 (6/7) 12;	331 (8/9) 16;
36,8 (9/10) 6;	110,7 (9/10) 8;	140,9 (0/2) 11;	176,8 (2/3) 14;	257,1 (0/2) 12;	290,2 (3/6) 12;	331,1 (9/10) 16;
36,8 (3/6) 3;	110,8 (1/5) 16;	143 (6/8) 15;	176,9 (0/2) 10;	261,8 (3/6) 10;	291,1 (7/9) 12;	333,2 (9/10) 16;
41,6 (6/8) 3;	119,9 (1/5) 16;	145,1 (0/2) 11;	181,3 (0/2) 10;	261,8 (2/3) 12;	295,4 (9/10) 12;	333,2 (9/10) 16;
41,7 (1/3) 5;	120 (0/1) 9;	145,2 (2/3) 11;	181,4 (6/7) 4;	262 (0/2) 12;	295,4 (6/7) 12;	340,3 (9/10) 16;
43,8 (3/6) 5;	122,1 (1/3) 9;	145,3 (8/9) 15;	181,5 (8/9) 11;	262,8 (6/8) 10;	297 (6/8) 12;	342,4 (9/10) 16;
43,8 (0/1) 8;	122,2 (0/1) 15;	152,1 (8/9) 15;	188,5 (9/10) 11;	268,8 (6/8) 10;	300,1 (8/9) 12;	
45,6 (1/3) 8;	122,3 (6/8) 2;	152,3 (6/8) 2;	188,6 (7/9) 4;	268,8 (3/6) 12;	302,3 (7/9) 12;	
45,6 (0/1) 2;	124,8 (0/1) 15;	156,4 (9/10) 15;	188,8 (6/7) 4;	269 (2/3) 12;	304,4 (9/10) 12;	
48,7 (1/5) 2;	124,9 (8/9) 2;	156,5 (3/6) 11;	192,9 (9/10) 4;	269,8 (0/2) 12;	306,6 (9/10) 12;	

Рис. 9.25 План перемещений робота

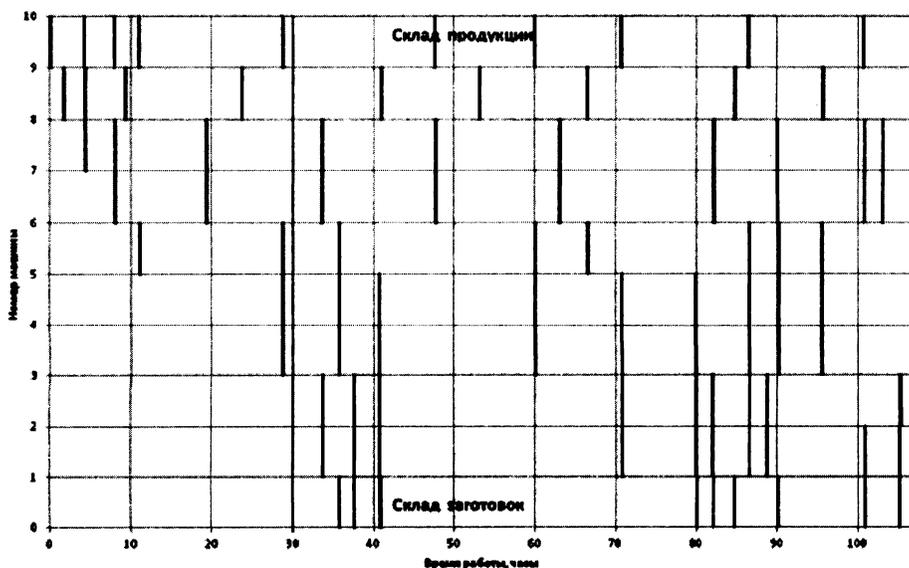
машины 9 на склад готовой продукции 10 переносятся детали работы 1 вида 3 (рис. 9.18), и соответствующий отрезок в начале движения робота окрашен в темно-синий цвет.

На втором шаге остаток деталей этой же работы сначала переносится с машины 8 на машину 9, а затем на третьем шаге – на склад. После этого робот переносит детали работы 7 такого же вида 3 с машины 7 на машину 9, и после окончания обработки – на склад готовой продукции.

На шестом шаге вид переносимой продукции меняется: детали для работы 2 вида 2 (коричневого цвета) последовательно переносятся с машины 6 на машину 8, с машины 8 на машину 9 и на склад. Далее робот переходит к последовательной транспортировке деталей для работы 6 того же вида 2 с машины 5 на 6, с машины 6 на машину 8, с машины 8 на машину 9 и, в конечном итоге, на склад.

По мере того, как освобождаются машины для старших операций, робот начинает транспортировку с машин все более ранних операций. В календарный момент 36,8 (рис. 9.25) детали для работы 3 вида 1 (черного цвета на рис. 9.26) перемещаются с машины 3 на машину 6 и далее на машину 8. После этого робот переходит к машине 1 и переносит детали работы 5 того же вида на освободившуюся машину 3, а затем на машину 6. Затем на освободившуюся машину 1 со склада заготовок подаются детали для работы 8 этого вида 1, которые после обработки переносятся на машину 3.

Обратим внимание на то, что, например, для машины 6 за время работы 60 часов должны быть выполнены 4 операции для работ 6, 3, 5 и 8, причем требуется только одна переналадка – с работы 6 на работу 3, т.к. первая работа 6 по виду 2 совпадает с начальной работой 2 (рис. 9.19). Аналогичная ситуация имеет место с машиной 3. После освобождения машины 1 от работы 5, она загружается работой 8 того вида 1, что также позволяет обойтись без переналадки.



**Рис. 9.26** Перемещения робота для горизонта, равного 150 календарных часов

Изучим последовательное выполнение работ на машинах (рис. 9.24). О работе 1 упоминалось выше, поэтому перейдем к изучению работы 2. В начальный момент (рис. 9.19) на машине 6 находились 50% работы 2. По плану, в 16 часов робот должен транспортировать соответствующие детали для работы 2 с машины 6 на машину 8 (рис. 9.25). После окончания обработки на машине 8 детали переносятся на машину 9 (рис. 9.24), где подвергаются обработке на последней операции. В момент 18,9 робот должен освободить машину 9.

Вторая часть деталей для работы 2 в объеме 50% запускается в производство на машине 1 в момент 45,6. Затем эта партия проходит обработку последовательно на машинах 5, 6, 8 и 9 и в момент 126,5 должна быть передана на склад. На рис. 9.23 можно проследить последовательность обработки обеих партий для работы 2 графически.

Рассмотрим случай выполнения работ в несколько партий на примере работы 12, в рамках которой требуется изготовить 90 штук деталей вида 3 (рис. 9.18). Для каждой детали этого вида, согласно табл.  $U\$35:AF\$40$  на листе 1 MS Excel, установлена норма занимаемого объема, равная 0,7 литра. В момент 257,1 часть работы 12 должна быть загружена во входной буфер машины 2, емкость которого составляет 30 л. Поэтому первая партия деталей насчитывает 43 детали, что составляет примерно 48% всей работы 12.

Поскольку емкость выходного буфера машины 2 равна емкости входного буфера, то в момент 261,4 вся загруженная первая партия должна находиться в выходном буфере. Детали этой партии в момент 261,8 должны быть перенесены роботом на машину 3 (рис. 9.25), однако емкость входного буфера машины 2 составляет только 25 литров. Поэтому переносится не вся партия, а только 36 деталей, что составляет 40% всей работы, а 7 деталей, т.е. 8% работы, остаются в выходном буфере машины 1.

В момент 262 робот снова пополняет входной буфер машины 2 партией из 43 деталей. Теперь, однако, после обработки до полного заполнения выходного буфера и остановки машины, во входном буфере остаются 7 деталей. Поэтому в момент 265,6 на машине 2 всего находится 56% работы 12, а в выходном буфере – только 40% (рис. 9.24).

После переноса партии деталей в 40% работы 12 в момент 268,9 с машины 3 на машину 6 (рис. 9.25) машина 3 освобождается. На следующем шаге в момент 269 робот переносит партию в 40% с машины 2 на машину 3, а затем в момент 269,8 – загружает остаток из четырех заготовок (4% от работы 12) на машину 2.

В результате в момент 270,2 (рис. 9.24) в выходном буфере машины 2 находится последняя (третья) партия в 20% работы 12. На дальнейших операциях производится дозагрузка машины 6 партией в 40% из машины 3. В результате в момент 274,6 полная загрузка машины 6 составляет 80% работы 12, а в выходном буфере машины 6 находится только 48%. Последняя партия в 20% заканчивает обработку на машине 3 в момент 275,9.

Первая партия в 40% работы 1, и вторая такая же партия, проходят обработку последовательно на машинах 7 и 9 и переносятся на склад в моменты 295,4 и 304,3. Последняя партия обрабатывается на машине 8, а затем на машине 9, и передается на склад в момент 306,6.

### 9.3.4 Листинг основной части программы

Как указывалось выше, при построении узлов дерева в каждом узле должна фиксироваться возможная пара машин. Для этой пары машин необходимо сохранять сведения о проценте работы, находящейся на каждой из машин, а также моменте прекращения обработки на машинах. Всего на каждом уровне построения дерева расписания используются 10 основных массивов.

В массивах *UStage()*, *VStage()*, *ParStage()*, *NPStage()*, как обычно, сохраняются функции затрат и полезности заказов, а также номера родительских узлов и номера строк работ на текущем уровне. Массивы *TranStage()* и *TPStage()* служат для записи номеров пар

машин и моментов переноса транспортных партий. В массивах *PerBStage()*, *PerLStage()*, *CompBStage()* и *CompLStage()* записываются проценты выполнения и моменты прекращения работы для первой и второй машины в парах. Соответственно для дальнейшего построения ветвей дерева путем перезаписи значений параметров недоминируемых узлов используются массивы *U()*, *V()*, *Par()*, *NP()*, *PerB()*, *PerL()*, *CompB()*, *CompL()*.

Большую роль в данной задаче играют массив выполненных процентов для каждой работы по каждой операции *Otm()*, массив средней трудоемкости на каждой операции для каждого вида работы *pavs()*, массив полной остающейся трудоемкости по каждой работе *pav()*, массив процентов начатого выполнения работ *Per0()*. Массив *Otm()* является двумерным – по каждой работе и по каждой операции, остальные массивы – одномерные.

Программа автоматически переносит данные с листа в переменные и массивы. После этого проводится расчет начальных параметров работ (рис. 9.27).

На рис. 9.27 для каждой работы последовательно, начиная от последней операции, рассчитывается накапливающийся процент выполнения *Per0* и остающаяся необходимая работа *pav*. Одновременно накапливается трудоемкость по всем работам на одной операции *Wip* и определяется необходимый момент запуска *gs*.

Затем программа анализирует все пары машин, и выделяет только те пары, в которых возможен последовательный перенос партий деталей от предыдущей операции к последующей.

Определение полезности массива невыполненных работ в текущем узле, как и ранее, производится с помощью функции *VZak()* (рис. 9.28), однако для работы которой необходимо задать не одну машину в узле, а параметры пары машин. Этими параметрами являются процессное время на первой *snPD* и второй машине *snPL*, а также моменты окончания обработки *snKD* и *snKL*. Входными значениями функции также являются количество работ *inBeta*, номер текущей работы *ink*, момент начала выполнения работы *snTk* и момент окончания работы *snFk*. Остаток трудоемкости выполняемой работы *snT* определяется как разность между необходимой работой *pav(i)* и выполняемой трудоемкостью на машинах *snPD* и *snPL*.

Для каждой работы определяется требуемый момент окончания первой необходимой операции *snComp*, момент освобождения машины принимается равным наибольшему из пары машин *snK*.

Поскольку каждая передача партии деталей с машины на машину производится после момента остановки обеих машин, для определения размера партии необходимо устанавливать текущую загрузку входного *Buf1* и выходного *Buf2* буферов (рис. 9.29). Объем заказа в партии *m* может быть больше или меньше емкости выходного буфера. В первом случае часть

```

For i = 1 To Beta 'цикл по работам (расчет массива трудоемкостей оставшихся операций)
  Per0(i) = ЭкV(i) ' уже выполненный процент работы
  pav(i) = Тt ' продолжительность передачи готового заказа на склад
  m = Vid(i) ' вид работы
  For j = Юрег To 1 Step -1 'цикл по операциям
    If j > Эк(i) Then 'для невыполненных операций
      Per0(i) = Per0(i) + Оtm(i, j)
      'накапливаемый процент выполнения работы с учетом "старших" операций
      Экес = Кол(i) * pavs(m, j) * (1 - Per0(i) / 100) 'остающаяся работа на текущей операции
      pav(i) = pav(i) + Экес 'накапливаемая необходимая работа после каждой операции
      Wip(j) = Wip(j) + Экес 'трудоемкость по всем работам на операции
    End If
  Next j
  gs(i) = dd(i) - pav(i) ' Необходимый момент запуска
Next i

```

Рис. 9.27 Определение начальных параметров работ

```

Function VZak(inBeta, ink, snPD, snPL, snKD, snKL, snTK, snFK)
Dim snP As Single
Dim snK As Single
Dim snI As Single
Dim snComp As Single
snP = Application.Max(snPD, snPL) 'наибольшая продолжительность текущих операций на паре машин
snK = Application.Max(snKD, snKL) 'наибольший момент освобождения из пары машин
VZak = 0
For i = 1 To inBeta
snComp = d(i) - pav(i) 'требуемый момент окончания первой необходимой операции текущей работы
If i = ink Then 'для выполняемой работы
snI = pav(i) - snPD - snPL 'остаток трудоемкости выполняемой работы
VZak = VZak + Vvbox(0.5, W(i), snPD, snPL, snComp, snKD, snTK, snFK) 'на первой машине
VZak = VZak + Vvbox(0.5, W(i), snPL, snPL, snComp, snKL, snTK, snFK) 'на второй машине
'вклад выполняемой операции
VZak = VZak + Vvbox(1, W(i), snI, snP, snComp, snK, snTK, snFK)
'вклад остальных операций выполняемой работы
Else
VZak = VZak + Vvbox(1, W(i), pav(i), snP, snComp, snK, snTK, snFK)
'вклад невыполненных работ
End If
Next i
End Function

```

Рис. 9.28 Функция полезности заказов

```

Private Sub BufStop(ByVal inMach As Integer, ByVal inOrder As Integer, ByVal inPer As Integer)
If inOrder > 0 Then 'если на машине есть заказ
m = Kol(inOrder) * Vol(Vid(inOrder)) * (inPer / 100) 'объем заказа в партии
Else
m = 0
End If
If m > MachV2(inMach) Then
'если объем заказа в партии превышает емкость выходного буфера
Buf1(inMach) = m - MachV2(inMach) 'часть остается во входном буфере
Buf2(inMach) = MachV2(inMach) 'выходной буфер заполняется полностью
Else 'если объем заказа в партии не превышает оставшуюся емкость выходного буфера
Buf1(inMach) = 0 'входной буфер пуст
Buf2(inMach) = m 'в выходном буфере находится объем заказа
End If
End Sub

```

Рис. 9.29 Процедура определения загрузки буферов

загруженной на машину работы остается во входном буфере, в противном случае входной буфер оказывается пуст.

После подготовки исходных массивов, как и в предыдущем параграфе, рассчитываются значения исходных значений критериев в корне дерева. Затем производится расчет основных параметров узлов первого уровня. Узлы дерева решения организуются в цикле по всем возможным парам машин *intPare*. Узлы дерева в данном случае относятся к одному из трех типов: для машин на последней операции; для предыдущих операций, кроме первой; для первой операции. На рис. 9.30 приведена процедура определения параметров узла первого уровня для последней операции.

Если на машине *b* для последней операции есть заказ (работа) с обозначением (номером) *Order0*, то может быть создан узел дерева с номером *n*, в котором с помощью процедуры *BufStop* определяется загрузка буферов. Номер строки работы, соответствующий ее обозначению определяется с помощью стандартной функции *DetermS*.

```

n = 0 'узел'
For i = 1 To intPare 'по возможным парам машин
  b = MachB(i) 'первая машина пары
  l = MachL(i) 'вторая машина пары
  If l = 0 Then 'для машин последней операции
    If Order0(b) > 0 Then 'если есть заказы на машине для последней операции
      n = n + 1 'строится узел дерева (передача на склад)
      Call BufeStop(b, Order0(b), C0(b)) 'параметры машин в момент остановки
      TranStage(n) = 1 'номер пары переноса
      NPStage(n) = Order0(b) 'номер строки заказов в узле
      sngOst = Application.Min(Buf2(b), VR) 'переносимый объем
      PerBStage(n) = (Buf1(b) + Buf2(b) - sngOst) / Vol(Vid(NPStage(n))) / Kol(NPStage(n)) * 100
      'процент оставшегося заказа на первой машине пары
      PerLStage(n) = sngOst / Vol(Vid(NPStage(n))) / Kol(NPStage(n)) * 100
      'процент перенесенного заказа на склад
      TPStage(n) = K0(b) + Tt 'момент переноса с машины на склад
      ParBStage(n) = 0 'рождительский узел
      Ekes = Application.Min(Buf1(b), MachV2(b) - (Buf2(b) - sngOst))
      'объем, возможный для переработки на первой машине пары
      pavB = p(Vid(NPStage(n)), b) * Ekes / Vol(Vid(NPStage(n)))
      'трудоемкость на первой машине пары
      CompBStage(n) = TPStage(n) + pavB 'момент прекращения обработки на первой машине пары
      CompLStage(n) = TPStage(n) 'момент поступления на склад
      VStage(n) = (V0 * TPStage(n)
      + VZak(Beta, NPStage(n), pavB, 0, K0(b), TPStage(n), TPStage(n), CompBStage(n))) / CompBStage(n)
      'функция полезности заказов
      UStage(n) = 0 'затраты на переналадку
    End If
  ...
End If

```

Рис. 9.30 Листинг расчета параметров на последней операции

Величина переносимого объема *sngOst* устанавливается по минимуму объема в выходном буфере машины или транспортной емкости робота. В соответствии с величиной объема *sngOst* рассчитываются значения процентов *PerBStage* и *PerLStage* заказа, остающихся на машине и переносимых на склад.

Во входном буфере машины может оставаться часть работы, которая должна начать обработку после освобождения объема выходного буфера с процессным временем этой обработки *pavB*. Окончание обработки на машине записывается в массив *CompBStage*, а время поступления на склад – в массиве *CompLStage*.

На рис. 9.31 приведен листинг для узлов с операциями, не включающих первую или последнюю. В том случае, когда для первой машины в паре есть заказ *Order0*, может быть создан узел дерева с номером *n*, если выполняются несколько условий. Для проверки этих условий с помощью процедуры *BufeStop* определяется загрузка буферов на первой машине *b* и второй машине *l* пары.

Прежде всего, в выходном буфере *Buf2* первой машины должны быть заготовки, и заготовки этого вида могут обрабатываться на второй машине. Если эти условия соблюдаются, перенос на вторую машину возможен в двух случаях. В первом случае оба буфера второй машины должны быть пустыми, а во втором случае на обеих машинах должен обрабатываться один и тот же заказ, причем емкость обоих буферов второй машины должна быть неполной. Определение остальных параметров узла в данном случае аналогично предыдущему на рис. 9.30.

На рис. 9.32 показан листинг для расчета узлов на первой операции. Вначале устанавливаются параметры буферов текущей машины, которая должна выполнять эту операцию. Если работа не начата ранее на 100%, для нее может быть построен новый узел дерева. В том случае,

```

If b > 0 Then ' для машины кроме первой операции
If Order0(b) > 0 Then 'если на первой машине есть заказ
  Call BuferStop(b, Order0(b), C0(b))
  Call BuferStop(1, Order0(1), C0(1))
End If
If Buf2(b) > 0 And p(Vid(m), 1) > 0 And ((Buf2(1) = 0 And Buf1(1) = 0)
Or (Order0(b) = Order0(1) And MachV2(1) - Buf2(1) > 0 And MachV1(1) - Buf1(1) > 0)) Then
' если есть следующая операция и следующая машина свободна, или на обеих машинах одинаковый заказ
n = n + 1 'строится узел дерева
TranStage(n) = 1 'номер пары переноса
NPStage(n) = Order0(b) ' номер строки заказов в узле
sngOst = Application.Min(Buf2(b), MachV1(1) - Buf1(1), VR) 'переносимый объем
PerBStage(n) = (Buf1(b) + Buf2(b) - sngOst) / Vol(Vid(NPStage(n))) / Kol(NPStage(n)) * 100
'процент оставшегося заказа на первой машине
PerLStage(n) = (Buf1(1) + Buf2(1) + sngOst) / Vol(Vid(NPStage(n))) / Kol(NPStage(n)) * 100
'процент заказа на второй машине после переноса
TPStage(n) = Application.Max(K0(b), K0(1)) + Tt 'возможный момент переноса
ParStage(n) = 0 'родительский узел
Ekes = Application.Min(Buf1(b), MachV2(b) - (Buf2(b) - sngOst))
' объем, возможный для переработки на первой машине
ravB = p(Vid(NPStage(n)), b) * Ekes / Vol(Vid(NPStage(n))) 'трудоемкость на первой машине
CompBStage(n) = TPStage(n) + ravB 'момент выполнения на первой машине
Ekes = Application.Min(Buf1(1) + sngOst, MachV2(1) - Buf2(1))
' объем, возможный для переработки на второй машине
ravL = p(Vid(NPStage(n)), 1) * Ekes / Vol(Vid(NPStage(n))) 'трудоемкость на второй машине
CompLStage(n) = TPStage(n) + ravL 'момент выполнения заказа на второй машине после переноса
Ekes = Application.Max(CompBStage(n), CompLStage(n)) ' максимальный момент выполнения
VStage(n) = (V0 * TPStage(n) + Vzak(Beta, NPStage(n), ravB, ravL, K0(b), K0(1), TPStage(n), Ekes)) / Ekes
'функция полезности заказов
If Order0(b) <> Order0(1) Then 'если переносится новый заказ
If Order0(1) > 0 Then 'если есть заказ на второй машине
  UStage(n) = Uzak(Order0(b), Order0(1), 1) 'затраты на наладку'
Else 'если нет заказа, находится средний
  Ekes = 0
  For j = 1 To Nvid
    Ekes = Ekes + s(Vid(m), j, 1)
  Next j
  UStage(n) = Ekes / Nvid 'средние затраты на наладку второй машины
End If
Else
  UStage(n) = 0
End If
End If
End If
...
End If

```

Рис. 9.31 Листинг расчета параметров на операциях, кроме первой и последней

если буфера машины пусты, может быть выполнена работа любого вида, в противном случае первая операция возможна как продолжение начатой работы.

Для каждого вновь создаваемого узла программа рассчитывает необходимое количество материала в килограммах и его объем в литрах. Если материала недостаточно для выполнения всей работы, определяется ее возможная часть. В том случае, материала недостаточно для 10% всей работы, работа не начинается.

В том случае, если материала достаточно хотя бы для части работы, и работа еще не полностью запущена в производство, рассчитываются параметры узла дерева. Вначале устанавливается переносимый объем *sngOst*, загружаемый на машину процент заказа и процент заказа, остающийся не загруженным. После этого определяется возможный объем обрабаты-

```

For j = 1 To Beta 'по всем работам на первой операции
If Per0(j) < 100 Then 'если работа не закончена
For x = 1 To Nvid 'по всем видам работ
If Vid(j) = x Then 'если вид работы совпадает с текущим
FlagM = 0 'флаг построения узла
If (Buf2(1) = 0 And Buf1(1) = 0) Then 'если следующая машина свободна
n = n + 1 'строится узел дерева
FlagM = 1
Else 'если машина загружена
If Order0(1) = j Then 'если заказ на машине совпадает с текущим в строке
n = n + 1 'строится узел дерева
FlagM = 1
End If
End If
End If
If FlagM = 1 Then 'если строится новый узел
TranStage(n) = 1 'номер пары переноса
NFStage(n) = j 'номер строки заказов в узле
q = Kol(j) * Nor(x) * (1 - Per0(j) / 100) 'необходимое количество материала для остатка заказа
z = Kol(j) * Vol(x) * (1 - Per0(j) / 100) 'физический объем остатка заказа в л
If Stock(x) < q Then 'если материала для заказа в первый день не хватает
y = Stock(x) / q 'возможная для выполнения часть работы
Else 'если материала для заказа в первый день хватает
y = 1 'можно выполнять всю работу
End If
If Stock(x) / (Kol(j) * Nor(x)) < 0.1 Then
'если запас меньше 10 процентов заказа, то ждем пополнения запаса
y = 0
End If
If y > 0 And q > 0 Then 'есть запас и заказ не закончен
sigOrd = Application.Min(MachV1(1) - Buf1(1), z * y, VR) 'переносимый объем
PerLStage(n) = (Buf1(1) + sigOrd) / Vol(x) / Kol(j) * 100
'процент заказа на второй машине после переноса
PerBStage(n) = 100 - Per0(j) - PerLStage(n) 'оставшийся незагруженный процент заказа
TPStage(n) = K0(1) + Tc 'возможный момент переноса
ParStage(n) = 0
Ekes = Application.Min(Buf1(1) + sigOrd, MachV2(1) - Buf2(1)) 'объем, возможный для переработки
parVL = p(x, 1) * Ekes / Vol(x) 'трудоемкость на второй машине
CompLStage(n) = TPStage(n) + parVL 'момент выполнения заказа на второй машине после переноса
...
End If
Next x
End If
Next j

```

Рис. 9.32 Листинг расчета параметров на первой операции

ваемых деталей и момент прекращения работы машины. Функции полезности рассчитываются аналогично рис. 9.31. Затем производится отсечение узлов по критериям и перенос в полные массивы недоминируемых узлов дерева решений.

На последующих уровнях *intY* построения дерева решений все этапы программы первого уровня повторяются с существенными изменениями. Для каждого узла *intZ* текущего уровня, на котором проводится ветвление, устанавливаются начальные значения переменных и массивов.

Для определения текущей загрузки машин необходимо определить номера работ на каждой машине, проценты загрузки работ на машины и моменты прекращения работы машин. Такой расчет проводится в два этапа. На первом этапе (рис. 9.33) восстанавливается цепочка узлов пар машин, образующих дерево решения вплоть до текущего уровня.

Как следует из рис. 9.33, в процессе восстановления цепочки узлов дерева определяются значения двух наборов массивов *PMachB*, *PerMachB*, *ClB* и *PMachL*, *PerMachL*, *ClL* для первых и вторых машин соответственно в парах машин, обслуживаемых роботом. Значения в

```

k = TreeStage(intZ)      'номер последнего узла '
Do Until k = 0
  b = MachB(Tran(k)) 'номер первой машины в узле
  l = MachL(Tran(k)) 'номер второй машины в узле
  m = Vid(NP(k))      'вид работы в узле
  If b > 0 Then 'если первая машина парк не склад материалов
    If CompB(k) > CLB(b) Then 'если время окончания работы первой машины в узле больше последнего времени
      PMachB(b) = NP(k) 'последняя работа на первой машине'
      PerMachB(b) = PerB(k) 'процент выполнения операций для последней работы на первой машине'
      CLB(b) = CompB(k) 'последний момент окончания работы первой машины в узле дерева '
    End If
  Else 'если первая операция в узле
    Distr(m) = Distr(m) + PerL(k) / 100 * Nor(m) * Kol(NP(k)) 'накапливание расхода по каждому виду работы
  End If
  If l > 0 Then 'если вторая машина парк не склад продукции
    If CompL(k) > CLL(l) Then 'если время окончания работы второй машины в узле больше последнего времени
      PMachL(l) = NP(k) 'последняя работа на второй машине'
      PerMachL(l) = PerL(k) 'процент выполнения операции для последней работы на второй машине'
      CLL(l) = CompL(k) 'последний момент окончания работы второй машины в узле дерева '
    End If
  Else 'если вторая машина парк это склад
    Per0(NP(k)) = Per0(NP(k)) + PerL(k) ' законченный процент заказа
  End If
  k = Par(k) 'переход по цепочке'
Loop

```

Рис. 9.33 Цепочка узлов вплоть до текущего уровня

массивах определяются для наибольших моментов окончания работ каждой из этих машин. В тех случаях, когда первой машиной пары является склад материалов, накапливается величина расхода материала соответствующего вида. Если второй машиной пары является склад готовой продукции, накапливаются законченные проценты заказов (работ).

Необходимость в раздельном определении массивов для первых и вторых машин в парах вызывается возможностью одновременного запуска обеих этих машин в момент переноса транспортной партии. Вторая машина пары, естественно, запускается после поступления на нее новой партии заготовок. Однако, первая машина партии также может запускаться в этот момент, поскольку ее выходной буфер освобождается, а во входном буфере могут находиться заготовки. При этом, в общем случае неизвестно, какая из этих машин закончит обработку раньше. Поэтому для того, чтобы установить фактическое состояние состояния всех машин, соответствующее узлу *intZ*, из которого производится ветвление, необходимо сравнить оба упомянутых набора массивов и выбрать наиболее поздние значения (рис. 9.34).

Из рис. 9.34 видно, что на втором этапе расчета параметров состояния машин эти параметры устанавливаются в зависимости от момента прекращения обработки либо по первой машине, либо по второй машине пары.

После определения состояния каждой машины в узле ветвления программа рассчитывает необходимое процессное время для каждой работы (рис. 9.35). Для этого сначала определяются значения массива *Otm* для каждой операции по каждому заказу в процентах. Затем в цикле по всех операциям для каждой работы накапливается процент *Per0* и соответствующее процессное время *pav*. В узле ветвления также определяются текущие запасы материалов для всех видов работ.

Наличие параметров *pav* позволяет определить значения функции *VZak()* во всех вновь создаваемых узлах. Остальные параметры для узлов последующих уровней определяются аналогично параметрам первого уровня. Отсечение узлов по критериям и перенос в полные массивы недоминируемых узлов дерева решений также производится аналогично узлам первого уровня.

```

For i = 1 To NMach                'по всем машинам '
If C1B(i) >= C1L(i) Then 'если для первой машины момент окончания больше,
'чем для второй, или моменты C1L и C1B одинаковы
  FMach(i) = FMachB(i) 'последняя работа на текущей машине
  PerMach(i) = PerMachB(i) 'процент выполнения операции для последней работы
  C1(i) = C1B(i) ' последний момент окончания обработки
Else 'если для второй машины момент окончания больше
  FMach(i) = FMachL(i)
  PerMach(i) = PerMachL(i)
  C1(i) = C1L(i)
End If
Next i

```

Рис. 9.34 Определение состояния всех машин в узле ветвления

```

ReDim Otm(Beta, NOper)
'массив выполненного количества по каждой операции по каждому заказу в процентах
For i = 1 To NMach                'по всем машинам '
If Order0(i) > 0 And FMach(i) = 0 Then 'если на машине есть старая работа и нет новой
  m = Determin3(Beta, Order0(i)) 'номер строки заказов на машине
  Otm(m, MachG(i)) = Otm(m, MachG(i)) + C0(i)
  'начальный процент выполнения работы на операции по всем машинам
End If
Next i
For i = 1 To NMach
If FMach(i) > 0 Then
  Otm(FMach(i), MachG(i)) = Otm(FMach(i), MachG(i)) + PerMach(i)
  'текущий процент выполнения работы на операции по всем машинам
  'накапливание нового значения процента выполнения операции
End If
Next i
For i = 1 To Beta 'цикл по работам (расчет массива трудоемкостей оставшихся операций)
rav(i) = Tc 'продолжительность передачи готового заказа на склад
m = Vid(i) ' вид работы
For j = NOper To 1 Step -1 'цикл по операциям
If j > Eк(i) Then 'для невыполненных операций
  Per0(i) = Per0(i) + Otm(i, j)
  'накапливаемый процент выполнения работы с учетом "старших" операций
  Eкес = Kol(i) * ravс(m, j) * (1 - Per0(i) / 100) 'оставшееся процессное время на текущей операции
  rav(i) = rav(i) + Eкес 'накапливаемое процессное время после каждой операции
End If
Next j
Next i

```

Рис. 9.35 Листинг расчета необходимого процессного времени по каждой работе

После окончания построения дерева решений, как и в предыдущей главе, определяется область расположения вариантов решения на листе и производится сортировка вариантов по убыванию массива  $V()$  критерия полезности. Поскольку количество получаемых вариантов мало (обычно вообще 1 вариант), то поиск лучшего варианта не проводится. На лист MS Excel выводятся план загрузки машин и план обработки, а на отдельной форме – графики диаграммы Ганта и движения робота.

### 9.3.5 Перепланирование расписания

Рассмотрим пример перепланирования задания, первоначально имеющего вид, приведенный на листе 1 в книге MBook8.xls. Как было указано в п. 9.3.1. задание на 15.09.16 8:00 состоит

из 16 работ шести видов. В случае, показанном на календарном графике, в течение первого и второго рабочего дня планируются две 12-часовые рабочие смены. Следующий календарный день выходной, после которого опять планируется двухсменная работа.

Поскольку продолжительность первого рабочего дня в данном случае составляет 24 часа, при работе в точном соответствии с расписанием, в течение рабочего дня (до момента 32 часа) должны быть задействованы машины 6, 8 и 9 (рис. 9.21). Положим, что к моменту окончания первого рабочего дня появилась срочная работа 17 вида 2 с требованием немедленного выполнения. В такой ситуации требуется перепланирование расписания, начиная со следующего рабочего дня.

Для корректировки расписания скопируем лист 1 на лист 2, очистим этот лист от результатов предыдущего расчета, введем отметки последних выполненных операций на момент начала нового планирования, а также запишем строку 17 нового задания (рис. 9.36). Как видно из рис. 9.36, для работ 1 и 7 выполнены все необходимые операции на 100% и они должны быть исключены из расписания. В то же время настройка на работу 7 по-прежнему сохраняется на машине 7, и поэтому при пересчета исходного списка эта работа в нем остается.

Для подготовки нового расписания в таблице состояния машин необходимо указать дату этого нового состояния. Кроме того, для каждой машины необходимо указать загруженную работы и ожидаемый процент ее выполнения на момент начало нового рабочего дня. Для проведения подготовки к перепланированию необходимо сдвинуть календарный график на единицу влево. Затем необходимо указать на использование режима перепланирования и ввести дан-

Обозначение (№ заказа)	Требуемый календарный день готовности и после начала	Вид работ	Количество		Отметка		Процент полного выполнения
			штук	штук	Бесовой коэффициент	последней законченной операции	
1	-1	3	70	1	3	100	
2	1	2	30	3	0	50	
3	2	1	40	1	1	0	
4	3	3	80	1	0	50	
5	4	1	40	1	0	0	
6	4	2	50	1	1	0	
7	5	3	30	1	3	100	
8	5	1	25	1	0	0	
9	6	1	30	1	0	0	
10	6	3	60	1	0	0	
11	6	4	70	1	0	0	
12	7	3	90	1	0	0	
13	7	5	20	1	0	0	
14	8	3	40	1	0	0	
15	8	6	50	1	0	0	
16	8	2	70	1	0	0	
17	0	2	40	3	0	0	

**Рис. 9.36** Состояние выполнения исходного задания на начало второго дня

ные о дате перепланирования и границах пересчета исходного задания (аналогично, например, п. 5.7). При пересчете строки законченных работ автоматически удаляются, а даты уменьшаются на одни сутки.

После подготовки к перепланированию, следует провести новый расчет расписания. При вводе данных обязательно необходимо откорректировать границы исходных работ. На рис. 9.37 приведена последовательность работы машин после перепланирования, при котором срочная работа 17 выполняется в начале расписания.

Корректировка расчета на 16.09	
Вариант 1 Машина 1:	(17, 2), (4, 4, 10, 10, 10, 10), 8, (12, 12, 12, 14, 14), (16, 16, 16)
Вариант 1 Машина 2:	9, 13, 12, (15, 15), (11, 11)
Вариант 1 Машина 3:	(5, 8, 9), (12, 12, 12, 12, 14, 14)
Вариант 1 Машина 5:	(17, 2), (4, 10, 10, 10, 10), 13, (15, 15), 16
Вариант 1 Машина 6:	3, (17, 2), 5, (4, 4, 10, 10, 10), 8, 13, 9, (12, 12, 12, 12, 12, 14, 14), (15, 15, 15), (11, 11, 11), (16, 16, 16)
Вариант 1 Машина 7:	(4, 4, 10, 10), 13, (12, 12, 12, 12, 14, 14)
Вариант 1 Машина 8:	3, (17, 2), 5, 10, (8, 9), (15, 15, 15, 15), (11, 11, 11), (16, 16, 16)
Вариант 1 Машина 9:	6, 3, (17, 2), (4, 4), 5, (10, 10, 10), 13, 8, (12, 12, 12, 12), 9, 15, (14, 14), (15, 15, 15, 15), (11, 11), (16, 16, 16)
Остаток расписания от 15.09	
Вариант 1 Машина 1:	8, (2, 16, 16, 16), 9, (15, 15, 15), 13
Вариант 1 Машина 2:	(11, 11), (4, 14, 10, 10, 12, 12, 12, 12)
Вариант 1 Машина 3:	(5, 8, 9), (15, 15), (11, 11), (4, 4, 14, 14, 10, 10, 12, 12, 12, 12)
Вариант 1 Машина 5:	(2, 16, 16), 13
Вариант 1 Машина 6:	(3, 5, 8), 2, 9, (15, 15, 15), (11, 11, 11), (4, 4, 14, 14, 10, 10, 10, 10, 12, 12, 12, 12, 12), (16, 16, 16), 13
Вариант 1 Машина 7:	(4, 4, 4, 14, 14, 12, 12), 13
Вариант 1 Машина 8:	(3, 5, 8), 2, 9, (15, 15, 15), (11, 11, 11), (10, 10, 10, 12), (16, 16)
Вариант 1 Машина 9:	6, (3, 5, 8), 2, 9, (15, 15, 15), 11, (4, 4), 11, (10, 10, 14, 14, 12, 12, 12, 12), 13, (16, 16, 16)

**Рис. 9.37** Сравнение расписания после корректировки с первоначальным расписанием

Из рис. 9.37 следует, что изменения в расписании вследствие появления срочной работы 17 привели к значительному перераспределению последовательности проведения работ на всех операциях. Причина таких существенных изменений заключается не только в сдвиге работ во времени, но также и в необходимости нового группирования работ по их видам.

Новая работа 17 имеет вид 2, совпадающий с видом работы 2 (рис. 9.36). Поэтому оказалось целесообразным объединить эти работы в одну группу на всех операциях. Появление новой и срочной группы из работ 17 и 2 привело к разрыву группы из работ 3, 5 и 8 на машине 6 и последующих операциях. Кроме того, увеличение общей загрузки привело к более равномерной загрузке машин, работающих параллельно на одной операции: машин 3 и 5 на второй операции и машин 7 и 8 на третьей операции.

### 9.3.6 Моделирование расписания

На листе 3 представлены варианты расчетов расписаний для исходного задания, совпадающего с заданием на рис. 9.18, при различных значениях ограничителей ветвления. На первом шаге моделирования установлены значения  $\alpha = 0, 1$ ,  $B_1 = 400$ ,  $B_2 = 100$  и  $B_3 = 0, 01$ , количество вариантов равно 1, а длительность решения составляет 9 сек. Наименьший коэффициент

запаздывания  $Kz$  наблюдается при  $\alpha = 0,1$ ,  $B1 = 25$ ,  $B2 = 10$  и  $B3 = 0,01$ , при этом среднее запаздывание  $Tc$  составляет 73 часа.

На листе 4 приведен пример моделирования расписаний, содержащий 36 работ. Результаты моделирования показаны на рис. 9.38. Как видно из этого рисунка, величина коэффициента запаздывания с ростом количества работ изменяется незначительно.

В то же время, абсолютные значения полной продолжительности планируемого набора работ и наибольшего запаздывания быстро нарастают. Величина среднего запаздывания до количества работ, равного 20, мало меняется, но затем также быстро увеличивается. Поэтому это значение имеет смысл считать критическим.



**Рис. 9.38** Параметры расписаний для разного набора работ: 1 – полная продолжительность набора работ; 2 – наибольшее запаздывание; 3 – среднее запаздывание; 4 – коэффициент запаздывания, умноженный на 100

## 9.4 Расписания для гибких линий процессного производства с позаказным планированием

Периодические процессы широко распространены в малотоннажном производстве для продуктов с большой добавленной стоимостью, таких как фармацевтические, пищевые и т.п. товары. В многопродуктовом производстве все выпускаемые продукты имеют одинаковую последовательность операций, в течение которых партии исходного сырья превращаются в партии готовой продукции. Объем партии, главным образом, определяется физической емкостью машины, на которой проводится первая операция. Вообще говоря, на последующих операциях этот объем может изменяться, если технологический процесс требует каких-либо добавок, либо после этой операции часть партии может быть реализована как самостоятельный продукт. Здесь полагается, что объем партии на всех операциях технологического процесса не изменяется.

Наибольшая эффективность производства достигается только в том случае, если каждая партия продукта, начиная от момента ее запуска в производство, уже предназначается для конкретного потребительского заказа. Поскольку, однако, размеры заказов, по большей части, не совпадают с рабочими объемами машин, размеры партий обычно также не совпадают с размерами заказов. Такое совпадение возможно в случае, если имеется только один заказ

на продукт определенного вида, и размер этого заказа меньше объема машины. В остальных случаях партия продукта либо предназначается для нескольких заказов, либо составляет часть одного заказа.

При переходе с одного продукта на другой предприятие несет затраты, связанные с переналадкой машин, их очисткой и утилизацией используемой моющей жидкости, а также с возможной потерей некоторого количества продукта. Кроме того, уменьшается пропускная способность линии. Исходя из этого, количество таких переходов (переналадок) должно быть минимальным.

Пример линии, предназначенной для выполнения четырех последовательных операций, приведен выше на рис. 9.1. В данном случае предполагается, что между машинами нет промежуточных накопителей. В соответствии со структурной формулой теории расписаний, поставленная задача может быть записана как

$$FF|batch, nmit, r_{jq}, d_i, s_{jom}|U, \bar{V}, \quad (9.8)$$

где *batch* – обозначение неизменности размера партии на всех операциях технологического процесса, *nmit* – требование отсутствия перерывов при обработке партии. Обозначения других параметров совпадают с обозначениями в предыдущем параграфе. Ограничение по наличию материала в данной задаче полностью совпадает с приведенным выше неравенством 9.3.

При построении каждого узла дерева, как и в предыдущем параграфе, отбираются пары машин, для которых должны выполняться некоторые требования. Прежде всего, для переноса партии с первой машины в паре *u* на вторую машину необходимо, чтобы в первой машины был продукт, а количество продукта во второй машины было равно 0, т.е.

$$b_{u1} > 0 \text{ и } b_{u2} = 0. \quad (9.9)$$

Количество продукта *sngOst* в паре *u* определяется имеющимся объемом продукта в первой машине и емкостью второй машины  $B_{u2}$

$$sngOst = \text{Min}(b_{u1}, B_{u2}). \quad (9.10)$$

#### 9.4.1 Исходные данные задачи

Исходные данные для составления расписания записываются на листе MS Excel электронной книги MBook9.xls, состоящей из четырех листов. На листе 1 в табл. \$A\$5:\$G\$24 находится задание, состоящее из 20 работ шести различных видов, которое приведено на рис. 9.39. Работы выполняются последовательно на четырех операциях, для чего в гибкой поточной линии установлены 8 машин.

В каждой строке задания описываются параметры работ: номер работы; требуемый момент день готовности; вид продукта; заказанное количество продукта в работе в тоннах; весовой коэффициент работы; номер последней законченной операции и процент уже выполненной работы.

В табл. \$W\$4:\$AD\$15 (рис. 9.40) записаны данные каждой из машин, причем в данном случае все машины находятся во включенном состоянии. Каждая из машин предназначена для выполнения одной из операций технологического процесса и относится к соответствующей группе. По каждой работающей машине приведены данные о ее настройке на конкретную

Обозначение (№ заказа)	Требуемый календарный день готовности и после начала	Вид продукта	Количество, т	Весовой коэффициент	Отметка последней законченной операции	Процент выполнения
1	-1	3	100	1	3	70
2	1	2	40	3	2	0
3	1	1	60	1	1	0
4	1	3	30	1	3	0
5	1	1	60	1	0	0
6	2	2	160	1	1	0
7	2	3	45	1	0	0
8	2	1	40	5	0	0
9	3	1	50	1	0	0
10	5	3	90	1	0	0
11	5	4	100	1	0	0
12	5	3	130	1	0	0
13	6	5	40	1	0	0
14	6	3	60	1	0	0
15	7	2	60	1	0	0
16	8	6	140	1	0	0
17	8	4	30	1	0	0
18	9	3	120	1	0	0
19	9	1	30	1	0	0
20	10	5	100	1	0	0

Рис. 9.39 Исходное задание на листе 1

Состояние машин на 15.09.16 8:00		1	2	3	4	5	6	7	8
Машина		1	2	3	4	5	6	7	8
Номер группы машин		1	1	2	2	2	3	3	4
Физическая емкость, куб. м		50	40	45	50	50	50	40	50
Стоимость часа наладки машины		2	2,5	2	1,8	2,8	2,5	3,5	1,8
Отметка включенной машины		1	1	1	1	1	1	1	1
Номер партии		16	0	15	14	13	12	11	10
Настройка машины на вид продукта		3	0	2	1	1	2	2	3
Заказы в партии	7;10;		0;6;15;		0;3;		6;	2;6;	1;4;
Проценты заказа в партии	100;60;		0;15;60;		0;100;		60;	100;25;	30;100;
Ожидаемый момент освобождения, часы		10	0	4	0	8	12	10	7
Длительность начальной подготовки машины в часах		2	1,5	2	1	1,5	2	2	1,5

Рис. 9.40 Начальная загрузка машин

работу на момент планирования (начало нового рабочего дня), процент загрузки работы на машину и ожидаемый момент окончания обработки.

В данном случае на любой машине может находиться партия продукта определенного вида, предназначенная сразу для нескольких заказов (работ). Запись обозначений работ в партии производится через точку с запятой, что облегчает программный анализ соответствующих текстовых строк. Аналогично записываются строки для процентов работ в партиях.

Если работа находится на машине и процент ее загрузки равен 100, то последней законченной операцией является предыдущая операция. Если процент работы, находящейся на машине, меньше 100, то для определения номера последней выполненной операции необходимо суммировать процент загрузки на разных машинах, а также процент уже выполненной работы. Номер

последней законченной операции устанавливается по номеру операции, для которой обработка или, по крайней мере, загрузка на машину уже произведена.

Например, в данном случае партия продукта вида 3 на машине 8, выполняющей операцию 4, предназначена для 30% работы 1 и 100% работы 4. Т.к. 70% работы 1 уже выполнено ранее (рис. 9.39), то последней законченной операцией для работы 1, а также для работы 4, является операция 3.

На машине 7 находится партия продукта 2, в которую входят 100% работы 2 и 25% работы 6. Очевидно, что операция 2 является последней законченной операцией для работы 2. Работа 6 находится параллельно на машинах 7 и 6 для операции 3, а также в количестве 15% от работы на машине 3, выполняющей операцию 2. Поэтому для работы 6 последней законченной операцией является операция 1. Эта же операция является последней законченной для работы 3. Для остальных работ в начальный момент необходимо планировать все операции.

В табл. \$V\$20:\$BQ\$25 приведены нормы времени в часах на переналадку с одного вида работы на другой для каждой из восьми машин. При этом, как и раньше, полагается, что номер предыдущего вида работы устанавливается по столбцу таблицы, а номер последующего вида работы – по строке таблицы. В табл. \$V\$35:\$AD\$40 записаны значения удельного веса каждого продукта в килограммах на литр; процессное время партии на каждой машине. В табл. \$W\$43:\$AD\$50 приведен график ожидаемого поступления сырья для всех видов продуктов.

В табл. \$W\$55:\$BG\$66 описан календарный график работы машины по дням, начинающийся с первого дня выполнения составляемого расписания. Для каждой смены календарного дня проставлено количество рабочих часов, для каждой машины указано плановое время проведения технического обслуживания. В приведенном примере предусмотрена двухсменная работа с двенадцатичасовым рабочим днем.

### 9.4.2 Работа с программой

Для работы с программой планирования в MS Excel устанавливается соответствующий рабочий лист, например, лист 1 и осуществляется запуск макроса. При выборе опции «без моделирования», система сообщает о последней дате планирования и предлагает одну из двух возможностей – подготовку планирования с новой датой или повторение расчета с последней датой.

В форме «Ввод данных» задаются основные параметры процесса. Система автоматически рассчитывает загрузку участка (по включенным машинам) и выдает соответствующее сообщение. По окончании расчета на лист выводятся коэффициенты загрузки по каждой группе машин. Поскольку количество возможных вариантов решения в этой задаче обычно не больше двух, и часто вообще равно единице значения, показатели расписания не выводятся. Все возможные и не доминируемые варианты загрузки машин выводятся на лист (рис. 9.41).

Недоминируемые варианты в результате расчета														
Вариант 1	Машина 1:	7;10;	5;	(10;12;	12;)	(13;20;	20;)	16;	(12;	14;	18;	18;)	16;	19;
Вариант 1	Машина 2:	11;	8;	(11;17;)	15;	20;	17;	9;						
Вариант 1	Машина 3:	(7;10;	10;12;	12;)	(11;17;)	(12;	14;	18;	18;)	16;				
Вариант 1	Машина 4:	5;	11;	16;	19;									
Вариант 1	Машина 5:	8;	(13;20;	20;)	15;	20;	17;	9;						
Вариант 1	Машина 6:	6;	(7;10;)	5;	(10;12;	12;)	8;	(11;	11;17;)	15;	(18;	18;)	16;	17;
Вариант 1	Машина 7:	2;6;	(6;15;)	3;	(13;20;	20;)	16;	12;	20;	14;	(19;	9;)		
Вариант 1	Машина 8:	(2;6;	6;)	(7;10;)	(6;15;)	5;	(10;12;	12;)	(3;	8;)	(13;20;	20;)	11;	16;
		(11;17;)	12;	20;	15;	(14;	18;	18;)	16;	(19;	9;)	17;		

Рис. 9.41 Результаты работы программы на листе 1

В качестве примера рассмотрим расчет для задания на рис. 9.39. Для каждой машины работы сгруппированы в скобках по видам, а группы разделены пробелами. Например, на машине 1 после окончания ранее начатой партии с заказами 7 и 10 запланирована партия, состоящая только из работы 5 вида 1. Затем запланированы 2 партии вида 3, причем первая из них предназначена для работы 10 и работы 12, а последующая – только для работы 12. Аналогично должны обрабатываться две партии вида 5 для работ 13 и 20. Затем планируется изготовить одну партию вида 6 для работы 16, 4 партии вида 3 для работ 12, 14 и 18 и еще раз изготовление одной партии вида 6 для работы 16. Последней на машине 1 запланирована партия вида 1 для работы 19.

### 9.4.3 Анализ результатов планирования

На рис. 9.42 показано расписание для единственного найденного варианта, составленное с учетом графика работы цеха. Для каждой машинной операции указывается момент начала в календарных часах, затем (через дробь) номер машины, с которой получена партия, номера работ в партии (в скобках) и момент окончания операции.

В данном случае, несмотря на относительно небольшую загрузку, имеет место достаточно высокая неравномерность загрузки машин для разных операций (рис. 9.43).

Программа автоматически стремится к тому, чтобы максимально возможно уменьшить простаивание наиболее загруженных машин 6, 7 и 8 групп 3 и 4. План загрузки машин изображен графически на рис. 9.44.

На рис. 9.45 приведены 25 сформированных партий готовой продукции, расположенные в порядке их выпуска. Для каждой партии приводятся их номера; (в скобках) номера работ и, (через дробь) проценты работы; моменты выпуска в календарных часах.

Машина 1: 8/0 (7,10) 10; 13/0 (5) 17; 17/0 (10,12) 22; 23/0 (12) 28; 43/0 (13,20) 48; 94/0 (20) 99; 102/0 (16) 108; 108,5/0 (12) 113,5; 117/0 (14) 122; 129/0 (18) 134; 145/0 (18) 150; 155,5/0 (16) 161,5; 164/0 (19) 168;  
 Машина 2: 8,8/0 (11) 13,8; 30,5/0 (8) 36,5; 37,3/0 (11,17) 42,3; 84,4/0 (15) 96,4; 108,7/0 (20) 111,7; 133,3/0 (17) 138,3; 141/0 (9) 147;  
 Машина 3: 12/1 (7,10) 19; 23/1 (10,12) 30; 41/1 (12) 48; 83,5/2 (11,17) 93,5; 117/1 (12) 124; 129/1 (14) 136; 145/1 (18) 152; 154/1 (18) 161; 163/1 (16) 167;  
 Машина 4: 17/1 (5) 22; 29,5/2 (11) 41,5; 108,5/1 (16) 112,5; 168/1 (19) 173;  
 Машина 5: 36,5/2 (8) 40,5; 92/1 (13,20) 96; 100,5/1 (20) 104,5; 107,5/2 (15) 116,5; 132,5/2 (20) 136,5; 140/2 (17) 150; 184/2 (9) 188;  
 Машина 6: 8/0 (6) 12; 20/3 (7,10) 26; 28,5/4 (5) 35,5; 40/3 (10,12) 48; 82/3 (12) 90; 90,5/5 (8) 97,5; 100/4 (11) 108; 116/3 (11,17) 124; 131/5 (15) 141; 153/3 (18) 161; 162/3 (18) 170; 171/3 (16) 181; 184/5 (17) 192;  
 Машина 7: 8/0 (2,6) 10; 11/3 (6,15) 25; 33,5/5 (3) 39,5; 98/5 (13,20) 100; 106,5/5 (20) 108,5; 113,5/4 (16) 125,5; 128/3 (12) 136; 139/5 (20) 141; 144/3 (14) 152; 173,5/4 (19) 179,5; 188,5/5 (9) 194,5;  
 Машина 8: 11/7 (2,6) 16; 17/6 (6) 22; 28/6 (7,10) 32; 33/7 (6,15) 38; 39/6 (5) 41; 48/6 (10,12) 52; 90/6 (12) 94; 95/7 (3) 97; 98,5/6 (8) 100,5; 102,5/7 (13,20) 105,5; 110,5/7 (20) 113,5; 114,5/6 (11) 120,5; 127/7 (16) 130; 131/6 (11,17) 137; 137/7 (12) 141; 143/7 (20) 146; 147/6 (15) 152; 152/7 (14) 156; 161/6 (18) 165; 170/6 (18) 174; 182,5/6 (16) 185,5; 186,5/7 (19) 188,5; 249,5/7 (9) 251,5; 252,5/6 (17) 258,5;

Рис. 9.42 План загрузки машин

Расчетные коэффициенты загрузки групп машин  
 Группа 1: 0,21  
 Группа 2: 0,2  
 Группа 3: 0,38  
 Группа 4: 0,41  
 Средний расчетный коэффициент загрузки машин 0,28

Рис. 9.43 Загрузка разных групп машин

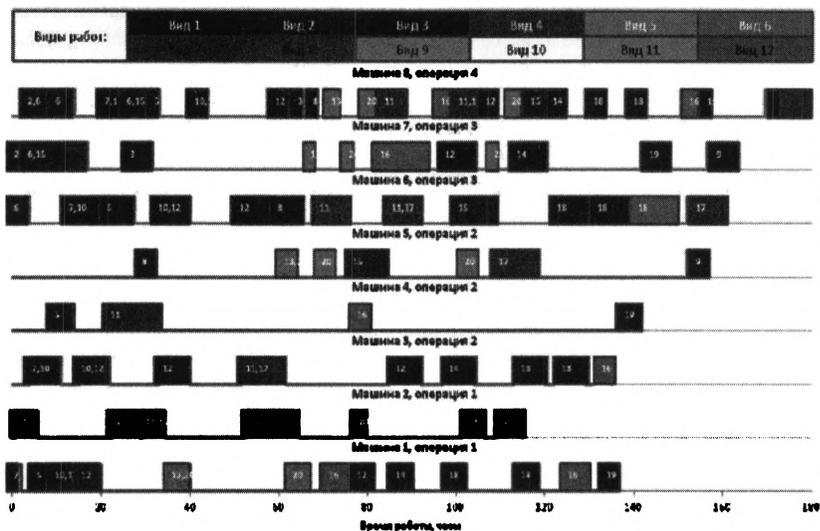


Рис. 9.44 Диаграмма Ганта

Готовая продукция по варианту 1	
Партия 10	вида 3: (1/30;4/100;) 7,3;
Партия 11	вида 2: (2/100;6/25;) 16,3;
Партия 12	вида 2: (6/60;) 22,3;
Партия 16	вида 3: (7/100;10/60;) 32,3;
Партия 15	вида 2: (6/15;15/60;) 38,3;
Партия 17	вида 1: (5/100;) 41,3;
Партия 18	вида 3: (10/40;12/37;) 52,3;
Партия 19	вида 3: (12/51;) 94,3;
Партия 13	вида 1: (3/100;) 97,3;
Партия 20	вида 1: (8/100;) 100,8;
Партия 21	вида 5: (13/100;20/60;) 105,8;
Партия 22	вида 5: (20/30;) 113,8;
Партия 23	вида 4: (11/60;) 120,8;
Партия 24	вида 6: (16/64;) 130,3;
Партия 25	вида 4: (11/40;17/66;) 137,3;
Партия 26	вида 3: (12/12;) 141,3;
Партия 27	вида 5: (20/10;) 146,3;
Партия 28	вида 2: (15/40;) 152,3;
Партия 29	вида 3: (14/100;) 156,3;
Партия 30	вида 3: (18/70;) 165,3;
Партия 31	вида 3: (18/30;) 174,3;
Партия 32	вида 6: (16/36;) 185,8;
Партия 33	вида 1: (19/100;) 188,8;
Партия 34	вида 1: (9/100;) 251,8;
Партия 35	вида 4: (17/34;) 258,8;

Рис. 9.45 График выпуска готовой продукции

## 9.4.4 Листинг основной части программы

Как указывалось выше, при построении узлов дерева в каждом узле должна фиксироваться возможная пара машин. Для этой пары машин сохраняются необходимые сведения об обработке партий на машинах. Всего на каждом уровне построения дерева расписания используются 10 массивов.

В массивах *UStage()*, *VStage()*, *ParStage()*, *CompStage()*, как обычно, сохраняются функции затрат и полезности заказов, а также номера родительских узлов и моменты окончания обработки партий на текущем уровне. Поскольку для каждой операции могут применяться несколько параллельных машин, необходим дополнительный массив *FStage()*. Массивы *TranStage()* и *Tk()* служат для записи номеров пар машин и моментов переноса партий, в массиве *PNStage()* записываются учетные номера партий продукции.

В массивах *NPStage()*, *QUStage()* записываются номера строк работ и проценты выполнения этих работ в партиях. Т.к. каждая партия может выполняться для несколько партий, или для части одной партии, последние массивы представляют собой текстовые строки. Для дальнейшего построения ветвей дерева путем перезаписи значений параметров недоминируемых узлов используются массивы *U()*, *V()*, *Par()*, *Comp()*, *FComp()*, *Tran()*, *TR()*, *PN()*, *NP()*, *QU()*.

Программа автоматически переносит данные с листа в переменные и массивы, после чего определяет значения в массиве средней трудоемкости на каждой операции для каждого вида работы *parv0()*. Как и в предыдущем параграфе, программа анализирует все пары машин, и выделяет только те пары, в которых возможен последовательный перенос партий продуктов от предыдущей операции к последующей. В отличие от других задач, рассмотренных выше, здесь для организации новых узлов дерева создаются партии продуктов, обеспечивающие несколько исходных работ одного вида. Для автоматического подбора таких работ в одной партии, работы ранжируются по возрастанию заданной даты выполнения (рис. 9.46) и записываются в упорядоченный массив *Order*.

Большую роль в данной задаче играет двумерный массив начальных выполненных процентов для каждой работы по каждой операции *Otm0()* (рис. 9.47). Для расчета значений этого массива анализируются строковые переменные *NP0* и *QP0* начальных значений партий на

```

Temp = "J5" 'положение сортировки'
Alfa = Range(Temp).Row
Gamma = Range(Temp).Column
For i = 1 To Beta
    Cells(Alfa + 1, Gamma).Value = d(i) 'обозначения для сортировки по дате выполнения '
    Cells(Alfa + 1, Gamma - 1).Value = i 'номера строк
Next i
Temp = Left(Temp, 1) & CStr(Alfa + Beta) 'определение области для сортировки '
Shift = Alfa + Beta 'начальное положение ячеек записи'
InstSheet.Range(Temp).Sort _
    Key1:=InstSheet.Columns(Gamma) 'ключ сортировки '
Temp = LTrim(Cells(Shift, Gamma).Value) 'удаление пробелов в последней строке сортировки'
For i = 1 To Beta
    Order(i) = Cells(Shift - Beta + 1, Gamma - 1).Value
    'номера строк, отсортированные по дате выполнения '
    Cells(Shift - Beta + 1, Gamma).Clear 'очистка после сортировок'
    Cells(Shift - Beta + 1, Gamma - 1).Clear
Next i

```

Рис. 9.46 Ранжирование заданных работ по дате выполнения

каждой машине. Как следует из рис. 9.47, на каждой операции значения массива *Otm0* для строки работы с номером *Job* суммируются по всем машинам соответствующей группы.

После этого определяется трудоемкость последующих оставшихся операций *pavs*, а также необходимый момент запуска *gs* (рис. 9.48). Здесь *Kol* равен количеству продукта в заказе, *Vol* – удельный вес продукта соответствующего вида, величина *VolPart* определяется как средний возможный размер партии.

В каждом узле ветвления необходимо определять планируемый расход по каждому виду материалов (рис. 9.49). Для этого используется функция *Volume*, в которой этот расход устанавливается по проценту каждой работы в партии. Входными величинами для функции являются строковые переменные номеров работ в партии *strNPU* и процентов этих работ *strQU*.

Величина трудоемкости последующих оставшихся операций *pavs* играет важную роль при определении полезности массива невыполненных работ в текущем узле с помощью функции *VZak()* (рис. 9.50). Входными значениями функции являются количество работ *inBeta*, номер текущей работы *ink*, номер текущей машины *inM*, момент окончания работы машины *snCl*, момент начала выполнения работы *snTk* и момент окончания работы *snFk*. Большинство параметров на рис. 9.50 совпадают со значениями на рис. 4.4. Величина *pav* представляет собой трудоемкость первой предстоящей операции в создаваемом узле дерева.

В каждом организуемом узле необходимо определять процент выполнения на текущей машине работы *aJ*, участвующей в текущей партии, а также отслеживать величину этого процента в массиве *Otm* (рис. 9.51). Одновременно в массиве *MStage* записывается текущий необходимый момент начала работы. Входными значениями процедуры *OrderSet* являются но-

```

For i = 1 To NMach          'наполнение массивов машин '
  MachG(i) = Cells(Alfa + 2, Gamma + i - 1).Value 'группа машин (номер операции)
  ...
  If PNO(i) > 0 Then 'если учетный номер партии на машине уже присвоен
    NPO(i) = Cells(Alfa + 8, Gamma + i - 1).Value 'заказы в партии
    QPO(i) = Cells(Alfa + 9, Gamma + i - 1).Value 'процент выполнения операции
    Shift = InStr(NPO(i), ";") 'выделение положения обозначения первой лексемы заказов'
    ShiftPer = InStr(QPO(i), ";") 'выделение положения обозначения первой лексемы процентов'
    Do Until Shift = 0 'цикл до последней работы'
      Temp = Left(NPO(i), Shift - 1) 'выделение первой лексемы в заказах '
      Job = CInt(Temp) 'выделение первого заказа'
      Job = DetexMS(Beta, Job) 'номер строки первого заказа
      NPO(i) = NPO(i) & CStr(Job) & ";" 'набор строк заказов в партии на текущей машине
      Temp1 = Left(QPO(i), ShiftPer - 1) 'выделение первой лексемы в заказах '
      Proc = CInt(Temp1) 'выделение процента первого заказа'
      Otm0(Job, MachG(i)) = Otm0(Job, MachG(i)) + Proc
      'процент выполнения работы на операции для разных машин
      NPO(i) = Right(NPO(i), Len(NPO(i)) - Shift) 'оставшаяся часть заказов без первой лексемы'
      QPO(i) = Right(QPO(i), Len(QPO(i)) - ShiftPer) 'оставшаяся часть процентов без первой лексемы'
      Shift = InStr(NPO(i), ";") 'выделение положения обозначения первой лексемы заказов'
      ShiftPer = InStr(QPO(i), ";") 'выделение положения обозначения первой лексемы процентов'
    Loop
    NPO(i) = Cells(Alfa + 8, Gamma + i - 1).Value 'заказы в партии
    QPO(i) = Cells(Alfa + 9, Gamma + i - 1).Value 'процент выполнения операции
  End If
  ...
Next i

```

Рис. 9.47 Определение начальных процентов выполнения работ по операциям

```

For i = 1 To Beta 'цикл по строкам работ
Per0(i) = EkV(i) ' уже полностью законченный процент работы в строке
pavz(i) = Tc ' продолжительность передачи готового заказа на склад
m = Vid(i) ' вид работы
For J = NOper To 1 Step -1 'цикл по операциям
If J > Ek(i) Then 'для невыполненных операций
Per0(i) = Per0(i) + Отсм0(i, J)
'накапливавшийся начатый процент выполнения работы с учетом "старших" операций
If Per0(i) > 100 Then
Per0(i) = 100
End If
Ekes = Kol(i) / Vol(m) / VolPart * (1 - Per0(i) / 100)
'расчетное количество партий на каждой операции для окончания заказа
Wip(J) = Wip(J) + Ekes * pav0(m, J) 'расчетная трудоемкость по всем работам на операции
If Int(Ekes) < Ekes Then
Ekes = Int(Ekes) + 1 'максимально необходимое количество партий
End If
pavz(i) = pavz(i) + Ekes * pav0(m, J)
'накапливаемая необходимая работа после каждой операции
End If
Next J
gs(i) = dd(i) - pavz(i) ' Необходимый момент запуска
Next i

```

Рис. 9.48 Расчет остающейся трудоемкости

```

Function Volume(strNPU, strQU)
Dim Shift As Integer 'указатель положения знака в строке'
Dim ShiftPer As Integer 'указатель положения знака в строке'
Dim Temp As String
Dim Temp1 As String
Dim Job As Integer
Dim Proc As Integer
Shift = InStr(strNPU, ";") 'выделение положения обозначения первой лексем заказов'
ShiftPer = InStr(strQU, ";") 'выделение положения обозначения первой лексем процентов'
Do Until Shift = 0 'цикл до последней работы'
Temp = Left(strNPU, Shift - 1) 'выделение первой лексем в заказах '
Job = CInt(Temp) 'выделение строки первого заказа'
Temp1 = Left(strQU, ShiftPer - 1) 'выделение первой лексем в заказах '
Proc = CInt(Temp1) 'выделение процента первого заказа'
Volume = Volume + Kol(Job) * Proc / 100 'расход материала в тоннах
strNPU = Right(strNPU, Len(strNPU) - Shift) 'оставшаяся часть заказов без первой лексем'
strQU = Right(strQU, Len(strQU) - ShiftPer) 'оставшаяся часть процентов без первой лексем'
Shift = InStr(strNPU, ";") 'выделение положения обозначения первой лексем заказов'
ShiftPer = InStr(strQU, ";") 'выделение положения обозначения первой лексем процентов'
Loop
End Function

```

Рис. 9.49 Функция расхода материалов в узле ветвления

мер операции *inMach*, номер организуемого узла дерева *inN*, текстовые строки номеров работ и их процентов *strNPU* и *strQU*.

После подготовки исходных массивов, как и в предыдущем параграфе, рассчитываются значения исходных значений критериев в корне дерева. Затем производится расчет основных параметров узлов первого уровня. Узлы дерева решения организуются в цикле по всем возможным парам машин *intPare*. Узлы дерева в данном случае относятся к одному из трех типов: для машин на последней операции; для предыдущих операций, кроме первой; для первой операции. На рис. 9.52 приведена процедура определения параметров узла первого уровня для последней операции.

```

Function VZak(inBeta, inK, inM, snCl, snTk, snFk)
Dim snPav As Single
Dim snComp As Single
VZak = 0
For i = 1 To inBeta
    snPav = pav(i) - pav(1) ' оставшаяся суммарная длительность операций одной работы
    snComp = d(i) - snPav
    'требуемый момент окончания первой необходимой операции текущей работы
    If aJ(i) > 0 Then 'для выполняемой работы
        VZak = VZak + Vybor(0.5, W(i), p(ink, inM), p(ink, inM), snComp, snCl, snTk, snFk)
        'вклад выполняемой операций
        VZak = VZak + Vybor(1, W(i), snPav, p(ink, inM), snComp, snCl, snTk, snFk)
        'вклад остальных операций выполняемой работы
    Else
        VZak = VZak + Vybor(1, W(i), pav(i), p(ink, inM), snComp, snCl, snTk, snFk)
        'вклад невыполняемых работ
    End If
Next i
End Function

```

Рис. 9.50 Функция полезности заказов в организуемом узле

Если на машине  $b$  для последней операции есть партия продукта для набора работ, описываемого строковой переменной  $NPU$ , может быть создан узел дерева с номером  $n$ , в котором с помощью процедуры  $OrderSet$  определяются работы  $aJ$ , участвующие в текущей партии, а также текущий необходимый момент начала работы  $MStage$ .

На рис. 9.53 приведен листинг для узлов с операциями, не включающих первую или последнюю. В том случае, когда для первой машины в паре есть партия продукта, может быть создан узел дерева с номером  $n$ , если вторая машина свободна и может быть использована для продукта текущего вида  $Vid$ . Набор работ в партии на второй машине полностью совпадает с набором в партии на первой машине, т.е. партия в данной задаче просто переносится.

После использования процедуры  $OrderSet$ , для любой работы со значением параметра  $aJ$  большим чем 0, определяется процессное время в новом узле. Если вид настройки второй машины известен, находится трудоемкость переналадки с этого вида работы на новый вид. В противном случае время переналадки устанавливается как среднее значение трудоемкости.

Возможный момент начала обработки в новом узле  $Tk$  определяется как максимальное время освобождения обеих машин в паре, и к этому значению прибавляется время переналадки. Т.к. процесс обработки исключает прерывания, то он должен закончиться до календарного момента наступления нерабочего времени. Поэтому момент  $Tk$  проверяется с помощью функции  $Commence()$ .

На первом уровне партия, переносимая с одной машины на другую, уже должна существовать, и соответственно, для нее должен быть определен номер. Момент окончания обработки партии  $CompStage$  определяется по началу обработки и ее процессному времени. Значение полезности заказов в узле устанавливается с помощью функции на рис. 9.50.

Программа расчета узлов на первой операции (рис. 9.54) имеет несколько вложенных циклов. Прежде всего, проводится внешний цикл  $i$  по возможным парам машин, из которых отбираются машины первой операции (вторая машина пары, первая машина – это склад материалов). Если отобранная машина свободна, то начинается первый внутренний цикл – по всем видам работ  $x$ .

По каждому виду работ может быть организовано несколько партий, и по всем этим партиям проводится цикл до достижения флага  $Flag1$  значения 1. Каждая образуемая партия может включать несколько работ, и следующий внутренний цикл осуществляется по количеству работ

```

Private Sub OrderSet(ByVal inMach As Integer, ByVal inN As Integer, _
    ByVal strNPU As String, ByVal strQU As String)
    Dim Shift As Integer 'указатель положения знака в строке'
    Dim ShiftPer As Integer 'указатель положения знака в строке'
    Dim Temp As String
    Dim Temp1 As String
    Dim Job As Integer
    Dim Proc As Integer
    Shift = InStr(strNPU, ";") 'выделение положения обозначения первой лексемы заказов'
    ShiftPer = InStr(strQU, ";") 'выделение положения обозначения первой лексемы процентов'
    Do Until Shift = 0 'цикл до последней работы'
        Temp = Left(strNPU, Shift - 1) 'выделение первой лексемы в заказах'
        Job = Cint(Temp) 'выделение первого заказа'
        If inN > 0 Then
            If MStage(inN) > 0 Then
                MStage(inN) = Application.Min(MStage(inN), gs(Job)) 'необходимый момент начала работы в узле
            Else
                MStage(inN) = gs(Job)
            End If
        End If
        Temp1 = Left(strQU, ShiftPer - 1) 'выделение первой лексемы в заказах'
        Proc = Cint(Temp1) 'выделение процента первого заказа'
        aJ(Job) = Proc 'заполнение процента выполнения работы в узле ветвления
        Osm(Job, inMach) = Proc 'процент выполнения работы при операции на машине в узле ветвления
        strNPU = Right(strNPU, Len(strNPU) - Shift) 'оставшаяся часть заказов без первой лексемы'
        strQU = Right(strQU, Len(strQU) - ShiftPer) 'оставшаяся часть процентов без первой лексемы'
        Shift = InStr(strNPU, ";") 'выделение положения обозначения первой лексемы заказов'
        ShiftPer = InStr(strQU, ";") 'выделение положения обозначения первой лексемы процентов'
    Loop
End Sub

```

Рис. 9.51 Процедура определения текущего процента выполнения работы на машине

внутри партии до достижения флага *Flagg* значения 1. Наконец, внутренний цикл проводится по всем возможным работам *J*. Для того, чтобы работа была возможной, необходимо, чтобы ее вид совпадал с текущим значением *x* в первом внутреннем цикле, чтобы ее текущее полное выполнение *Per* было меньше 100%, и на складе находилось хотя бы некоторое количество потребного сырья. На рис. 9.55 приведен листинг ограничений на организацию новых узлов.

При создании нового узла сначала рассчитывается необходимое количество материала *q* для выполнения остатка работы. Затем по наличию материала устанавливается возможная часть *y* выполнения работы. Если материала достаточно только для 10% остающейся работы, то новый узел дерева не создается. Наконец, для организации нового узла необходимо, чтобы текущая занятая емкость машины *sngVol* была равна 0.

На рис. 9.56 приведен механизм выхода из цикла внутри партии из нескольких работ по флагу *Flagg* и партиям одного вида *x* по флагу *Flag1*. В том случае, если заказ не умещается целиком в остающийся незанятый объем машины, текущая занятая емкость *sngVol* равна физической емкости машины и новый узел можно считать полностью сформированным. В этом случае оба флага выхода устанавливаются в единицы, программа рассчитывает остальные параметры узла и переходит к следующему виду работ *x* в первом внутреннем цикле.

Если заказ умещается полностью в остающийся незанятый объем машины, процент этого заказа в партии равен 100%. Если этот заказ еще не входил в узлы, которые были образованы ранее, (в этом случае объем в машине с текущим заказом *sngVol* больше, чем максимальный объем *sngVolP* предыдущих узлов в цикле по работам в партии), фиксируется новый узел, дальнейшее накапливание работ в текущей партии прекращается, и флаг *Flagg* устанавлива-

```

For i = 1 To intPare 'по возможным парам машин
  b = MachB(i) 'первая машина
  l = MachL(i) ' вторая машина
  If l = 0 Then ' для машин последней операции
    If NPU(b) <> "" Then 'если есть партия на первой машине пары
      ReDim aJ(Beta)
      n = n + 1 'строится узел дерева
      Call OrderSet(NOper + 1, n, NPU(b), QP(b))
      TranStage(n) = i 'номер пары переноса
      NPStage(n) = NPU(b) 'набор строк в партии на первой машине пары
      QUStage(n) = QP(b)
      Tk(n) = Cl(b)
      FNStage(n) = PMach(b)
      CompStage(n) = Tk(n) + Tt
      ParStage(n) = TreeStage(intZ) 'Номер родительского узла'
      VStage(n) = sngVz
      UStage(n) = sngUz
    End If
  ...
End If
Next i

```

Рис. 9.52 Листинг расчета параметров на последней операции

ется в единицу. Если запас сырья вида  $x$  в узле становится меньше 0 или запас  $y$  меньше необходимого для заказа, оба флага выхода устанавливаются в единицы.

В любом случае, если фиксируется новый узел, программа рассчитывает остальные параметры узла и переходит к следующему виду работ  $x$  в первом внутреннем цикле.

Наконец, в том случае, если заказ уместается полностью в остающийся незанятый объем машины, и уже входил в узлы, образованные ранее, флаг *Flagg* остается равным нулю, и программа, работая во внутреннем цикле по работам  $J$  (рис. 9.54), продолжает включать в партию новые работы. Этот процесс продолжается до тех пор, пока в партии не появится работа, которая ранее не включалась в партию, и *Flagg* не станет равным 1. Тогда будет зафиксирован новый узел, для которого будут рассчитываться его параметры.

В случае, если программа организует новый узел, но затем в списке работ отсутствует новая, еще не включенная работа, этот узел автоматически удаляется (рис. 9.57).

После расчета параметров узлов первого уровня производится отсеивание узлов по критерию. Отличие этого процесса в данном случае состоит в том, что в качестве критерия требуемой даты выполнения используется не дата одной работы  $gs$ , а необходимый момент начала обработки в узле  $MStage$  (рис. 9.51). Затем, обычным способом производится перенос недоминируемых узлов дерева решений на первом уровне в полные массивы.

На последующих уровнях *intY* построения дерева решений все этапы программы первого уровня повторяются с существенными изменениями. Для каждого узла *intZ* текущего уровня, на котором проводится ветвление, устанавливаются начальные значения переменных и массивов.

Как следует из рис. 9.58, в процессе восстановления цепочки узлов дерева определяются значения пяти массивов *PMach*, *VMach*, *Cl*, *NPU* и *QP* для каждой машины, причем значения в массивах определяются для наибольших моментов окончания работ каждой из этих машин. Если в текущем узле цепочки машина является первой в паре, она освобождается в момент переноса партии. На первой операции перенос происходит со склада материалов, и в этот момент учитывается величина текущего расхода по виду работы. Для расчета используется функция *Volume* (рис. 9.49). Если второй машиной пары является склад готовой продук-

```

If b > 0 Then 'для операций после первой
If NPU(b) <> "" And VMach(b) > 0 And NPU(1) = "" Then ' для машины кроме первой операции
' если есть партия на первой машине и следующая машина свободна и работа на машине возможна
If p(VMach(b), 1) > 0 Then
  ReDim pav(Beta)
  'массив значений трудоемкости первой предстоящей операции на конкретной машине в узле'
  ReDim Per(Beta) 'процент полностью выполненной работы в текущий момент в узле'
  ReDim aJ(Beta) 'массив процентов текущего выполнения работ в узле'
  n = n + 1 'строится узел дерева
  Call OrderSet(MachG(1), n, NPU(b), QP(b))
  TranStage(n) = 1 'номер пары переноса
  NPStage(n) = NPU(b) 'набор строк в партии на первой машине пары
  QJStage(n) = QP(b) 'проценты работ в узле
  ParStage(n) = TreeStage(intZ) 'Номер родительского узла'
  For J = 1 To Beta 'по всем работам
    If aJ(J) > 0 Then
      pav(J) = p(VMach(b), 1) 'процессное время партии в узле
    End If
  Next J
If VMach(1) > 0 Then 'если есть продукт на второй машине
  Ekes = s(VMach(b), VMach(1), 1) 'трудоемкость переналадки
  UStage(n) = sngUz + Uzak(VMach(b), VMach(1), 1) 'затраты на наладку'
Else 'если не заказа, находится средний
  Ekes = 0
  For k = 1 To Nvid
    Ekes = Ekes + s(VMach(b), k, 1) 'накапливание трудоемкости переналадки
  Next k
  Ekes = Ekes / Nvid 'средняя трудоемкость переналадки
  UStage(n) = sngUz + Ekes 'средние затраты на наладку второй машины
End If
Tk(n) = Application.Max(Cl(b), Cl(1)) + Ekes 'возможный момент начала с учетом переналадки
Tk(n) = Commence(Tk(n), p(VMach(b), 1), 1)
'возможное начало операции проверяется по календарному ограничению на окончании '
PNStage(n) = PMach(b) 'номер партии в узле устанавливается по уже существующему
CompStage(n) = Tk(n) + p(VMach(b), 1) 'момент окончания работы в календарных часах
If CompStage(n) = 0 Then 'если не определен момент окончания работы
  MsgBox " недостаточен рабочий горизонт "
  Exit Sub
End If
VStage(n) = (V0 * Cl(1) + VZak(Beta, VMach(b), 1, Cl(1), Tk(n), CompStage(n))) / CompStage(n)
'полезность набора работ в узле
End If
End If
...
End If

```

Рис. 9.53 Листинг расчета параметров на операциях, кроме первой и последней

ции, накапливаются законченные проценты заказов (работ), для чего используется процедура *OrderSet* (рис. 9.51).

После восстановления цепочки узлов в каждом узле ветвления *intZ*, пересчитывается двумерный массив начальных выполненных процентов для каждой работы по каждой операции *Otm0*, массив *Per0* начатых процентов выполнения работ, массив *pavs* остающейся трудоемкости и массив *Stock* имеющихся запасов.

Наличие параметров *pavs* позволяет определить значения функции *VZak()* (рис. 9.50) во всех вновь создаваемых узлах. Остальные параметры для узлов последующих уровней определяются аналогично параметрам первого уровня. Отсечение узлов по критериям и перенос в полные массивы недоминируемых узлов дерева решений также производится аналогично узлам первого уровня.

После окончания построения дерева решений, как и в предыдущей главе, определяется область расположения вариантов решения на листе и производится сортировка вариантов по

```

For i = 1 To intPare 'по возможным парам машин
b = MachB(i) 'первая машина
l = MachL(i) ' вторая машина
If l = 0 Then ' для машин последней операции
...
Else
If b > 0 Then 'для операций после первой
...
Else 'для первой операции
If MPU(1) = "" Then 'если машина свободна
For x = 1 To MVID 'по всем видам работ
...
Flag1 = 0 'флаг партий в узле
sngVolP = 0 'занятый объем партии после расчета узла
Do Until Flag1 = 1 'цикл по узлам партий, включавших несколько заказов
If sngVolP < MachV(1) Then 'если возможны варианты пополнения партии
Flagg = 0 'флаг заказов в одной партии
...
Do Until Flagq = 1 'по заказам в одном узле
...
For J = 1 To Beta 'по всем работам
If Vid(Ordex(J)) = x And Per0(Ordex(J)) < 100 And Stock(x) > 0 Then
'если вид работы строки списка, отсортированного по дате,
'совпадает с текущим видом работы и есть невыполненный остаток и материал
...
n = n + 1 'строится новый узел дерева
...
End If
Next J
...
Loop
sngVolP = sngVol 'запоминаем объема в последнем построенном узле
End If
Loop
...
Next x
End If
End If
End If
Next i

```

Рис. 9.54 Вложенные циклы для расчета параметров на первой операции

убыванию массива  $V$  критерия полезности. Поскольку количество получаемых вариантов мало (обычно вообще 1 вариант), то поиск лучшего варианта не проводится. На лист MS Excel выводятся план загрузки машин и партии готовой продукции, а на отдельной форме – диаграмма Ганта.

```

q = Kol(Order(J)) * (1 - Per0(Order(J)) / 100)
' необходимое количество материала для остатка заказа
If Stock(x) < q Then ' если материала для заказа в первый день не хватает
  y = Stock(x) / q 'возможная для выполнения часть работы
Else ' если материала для заказа в первый день хватает
  y = 1 'можно выполнять всю работу
End If
If Stock(x) / Kol(Order(J)) < 0.1 Then
'если запас меньше 10 процентов заказа, то ждем пополнения запаса
  y = 0
End If
If y = 0 Or q = 0 Then 'выход по нехватке запаса или полного запуска заказа
  Flagg = 1 'флаг выхода по заполнению машины
  Flag1 = 1 'флаг выхода
Else
  If sngVol = 0 Then 'в начале построения узла занятый объем партии равен 0
    n = n + 1 'строится новый узел дерева
  End If
  ...
End If

```

Рис. 9.55 Ограничения на организацию новых узлов дерева

```

NPStage(n) = NPStage(n) & CStr(Order(J)) & ";"
'набор выбранных строк заказов в партию
If MachV(1) - sngVol <= Kol(Order(J)) * y / Vol(x) Then
'если заказ не умещается в остающемся объеме машины
  QUStage(n) = QUStage(n) & CStr(Int((MachV(1) - sngVol) /
    / (Kol(Order(J)) * y / Vol(x)) * 100)) & ";"
  sngVol = MachV(1) 'машина заполнена
  Flagg = 1 'флаг выхода из партии по заполнению машины
  'фиксируется новый узел
  Flag1 = 1 'флаг выхода из набора партий одного вида
Else 'если заказ умещается в остающемся объеме машины
  QUStage(n) = QUStage(n) & CStr(100 * y) & ";" 'процент заказа 100
  sngVol = sngVol + Kol(Order(J)) * y / Vol(x) 'вновь занятый объем
  If sngVol > sngVolP Then 'если заказ входит в узел первый раз
    Flagg = 1 'флаг выхода из внутреннего цикла по работам внутри партии
    'фиксируется новый узел
    Stock(x) = Stock(x) - Kol(Order(J)) * y / Vol(x) 'остающийся запас
    If Stock(x) <= 0 Or y < 1 Then
      Flag1 = 1 'флаг выхода из набора партий одного вида
      If Stock(x) <= 0 Then
        Stock(x) = 0
      End If
    End If
  End If
End If
End If
End If

```

Рис. 9.56 Организация флагов выхода из внутренних циклов

```

If sngVol < MachV(1) And sngVol = sngVolP Then
'если в списке больше нет ни одного нового заказа с текущим видом х
'для включения в партию, и заполнение машины остается неполным
NPStage(n) = "" 'очистка параметров узла
QUStage(n) = ""
n = n - 1 'введение дополнительного узла отменяется
Flagq = 1 'флаг выхода из набора заказов в партии
Flag1 = 1 'флаг выхода из набора партий одного вида
End If

```

Рис. 9.57 Удаление узла, для которого отсутствует новая возможная работа

```

k = TreeStage(intZ) 'номер последнего узла '
Do Until k = 0
b = MachV(Tran(k)) 'номер первой машины в узле
l = MachL(Tran(k)) 'номер второй машины в узле
Shift = InStr(NP(k), ";") 'выделение положения обозначения первой лексемы строк заказов'
Temp = Left(NP(k), Shift - 1) 'выделение первой лексемы '
Job = CInt(Temp) 'выделение строки первого заказа'
m = Vid(Job) 'переносимый вид продуктов на машине'
If b > 0 Then 'если операция не первая
If TR(k) >= Cl(b) Then 'если время переноса больше времени освобождения первой машины в узле
Cl(b) = TR(k) 'момент освобождения первой машины в узле дерева '
NPU(b) = ""
QP(b) = ""
End If
Else 'если первая операция в узле
NPT = NP(k) 'промежуточная переменная
QPT = QU(k) 'промежуточная переменная
Distr(m) = Distr(m) + Volume(NPT, QPT)
'накапливание расхода по каждому виду работы (материала) в кг
End If
If l > 0 Then 'если операция не последняя
If Comp(k) > Cl(1) Then 'если время окончания работы второй машины в узле
'больше последнего времени для этой машины
FMach(1) = FN(k) 'последний номер партии на второй машине
VMach(1) = m 'последний вид продукта на второй машине'
Cl(1) = Comp(k) 'последний момент окончания работы второй машины в узле дерева '
NPU(1) = NP(k) 'строки заказов на машине
QP(1) = QU(k) 'проценты заказов на машине
End If
Else 'для последней операции
ReDim aJ(Beta) 'очистка меток выполнения заказа
Call OrderSet(NOPeg + 1, 0, NP(k), QU(k)) 'определение процентов выполнения
For i = 1 To Beta
If aJ(i) > 0 Then
Per(i) = Per(i) + Ota(i, NOPeg + 1) 'полностью выполненный процент заказа
End If
Next i
End If
k = Par(k) 'переход по цепочке'
Loop

```

Рис. 9.58 Цепочка узлов вплоть до текущего уровня

### 9.4.5 Перепланирование расписания

Рассмотрим пример перепланирования задания, первоначально имеющего вид, приведенный на листе 1 в книге MBook9.xls. Как было указано в п. 9.4.1. задание на 15.09.16 8:00 (рис. 9.39) состоит из 20 работ шести видов. В случае, показанном на календарном графике, в течение первого и второго рабочего дня планируются две 12-часовые рабочие смены. Следующий календарный день выходной, после которого опять планируется двухсменная работа.

Поскольку продолжительность первого рабочего дня в данном случае составляет 24 часа, при работе в точном соответствии с расписанием, в течение рабочего дня (до момента 32 часа) задействуются все машины. Положим, что к моменту окончания первого рабочего дня появилась срочная работа 21 вида 5 с требованием немедленного выполнения. В такой ситуации требуется перепланирование расписания, начиная со следующего рабочего дня.

Для корректировки расписания скопируем лист 1 на лист 2, очистим этот лист от результатов предыдущего расчета, введем отметки последних выполненных операций на момент начала нового планирования, а также запишем строку 21 нового задания (рис. 9.59). Как видно из рис. 9.59, для работ 1, 2, 4 и 7 выполнены все необходимые операции на 100% и они должны быть исключены из расписания. Затем необходимо сдвинуть рабочий календарь и график поступления сырья на единицу влево.

Обозначение (№ заказа)	Требуемый календарный день и после начала	Продукт	Количество		Отметка	Процент
			Бесовой	последней		
			коэффициент	законченной операции	выполнения	
1	-1	3	100	1	4	100
2	1	2	40	3	4	100
3	1	1	60	1	2	0
4	1	3	30	1	4	100
5	1	1	60	1	2	0
6	2	2	160	1	3	85
7	2	3	45	1	4	100
8	2	1	40	5	0	0
9	3	1	50	1	0	0
10	5	3	90	1	1	60
11	5	4	100	1	0	0
12	5	3	130	1	0	0
13	6	5	40	1	0	0
14	6	3	60	1	0	0
15	7	2	60	1	0	0
16	8	6	140	1	0	0
17	8	4	30	1	0	0
18	9	3	120	1	0	0
19	9	1	30	1	0	0
20	10	5	100	1	0	0
21	1	5	80	3	0	0

Рис. 9.59 Состояние выполнения задания на начало второго дня

Для подготовки нового расписания в таблице состояния машин необходимо указать дату этого нового состояния. Затем для каждой машины необходимо указать обозначения загруженных работ в партиях на момент начало нового рабочего дня (рис. 9.60). Например, для машины 1, в момент 32 часа (8 часов следующего рабочего дня) обработка вообще не должна проводиться, а предыдущая партия для работы 12 должна быть закончена в 28 часов (или 4 часа нового дня) (рис. 9.42). Исходя из плана на рис. 9.42, эта партия должна быть передана с машины 1 на машину 3 в момент 41 час, что позже начала нового дня. Поэтому в момент 32 часа партия для работы 12 должна еще находиться на машине 1.

Найдем эту партию на рис. 9.45 для графика выпуска готовой продукции. Здесь она фигурирует как партия номер 19 вида 3 для работы 12 с процентом выполнения заказа, равным 51%. Эти данные записываем в таблицу на рис. 9.60.

На машине 2 в момент 32 часа осуществляется обработка заказа 8 (рис. 9.42), которая должна быть закончена в момент 36,5 часов (или 12,5 часов нового дня). Переходя к рис. 9.45, находим партию 20 вида 1 для заказа 8 с процентом выполнения 100. Аналогичное положение происходит на машинах 3, 4, 6 и 7. Машина 5 в первый день планирования в расписании не участвовала. В машине 8 в момент 32 часа происходит перенос партии для заказов 7 и 10 на склад. По рис. 9.45 определяем, что это должна быть партия номер 16 вида 3. Очевидно, что момент освобождения машины 8 равен 8 часов нового дня.

При перепланировании необходимо провести расчет имеющихся запасов с учетом их расхода в первый день. Новые партии, запущенные в первый день, определяются по загрузке машин 1 и 2, предназначенных для первой операции (рис. 9.42). В соответствии с этим графиком загрузки, всего таких партий 4, причем на машине 1 выполняется партия для работы 5; партия для работ 10;12; и партия для работы 12; а на машине 2 – для работы 11;

В данном случае использовалось сырье трех видов: вид 1 для работы 5, вид 3 для работ 10 и 12, вид 4 – для работы 11, причем сырье вида 3 требовалось для двух партий. В результате расчета (рис. 9.61) определяется расход сырья по каждому виду, после чего необходимо уменьшить начальные запасы на значения расхода по каждому виду.

Затем необходимо указать на использование режима перепланирования и ввести данные о дате перепланирования и границах пересчета исходного задания (аналогично, например, п. 5.7). При пересчете строки законченных работ автоматически удаляются, а даты уменьшаются на одни сутки.

После подготовки к перепланированию, следует провести новый расчет расписания. При вводе данных обязательно необходимо откорректировать границы исходных работ. На рис. 9.62

Состояние машин на		16.09.16 8:00							
Машина		1	2	3	4	5	6	7	8
Номер группы машин		1	1	2	2	2	3	3	4
Физическая емкость, куб. м		50	40	45	50	50	50	40	50
Стоимость часа наладки машины		2	2,5	2	1,8	2,8	2,5	3,5	1,8
Отметка включения машины		1	1	1	1	1	1	1	1
Номер партии		19	20	18	23	13	17	15	16
Настройка машины на вид продукта		3	1	3	1	1	1	2	3
Заказы в партии	12;		8;	10;12;	11;	3;	5;	6;15;	
Проценты заказа в партии	51;		100;	40;37;	60;	100;	100;	15;60;	
Освобождаемый момент освобождения		4	12,5	6	17,5	0	11,5	1	8
Длительность начальной подготовки машины в часах		2	1,5	2	1	1,5	2	2	1,5

Рис. 9.60 Начальная загрузка машин при перепланировании

Заказы	5;	10;12;	12;	11;	
Проценты	100;	40;37;	51;	60;	
Вид		1	3	3	4
Количество на заказ, т	60;	90;130;	130;	100;	
Расход на партию, т	60;	36;48,1;	66,3;	60;	Всего, т
Вид 1		60			60
Вид 3			84	66	150
Вид 4				60	60

Рис. 9.61 Расчет использованного сырья за первый плановый день

приведена последовательность работы машин после перепланирования, при котором срочная работа 21 выполняется в начале расписания.

Из рис. 9.62 следует, что изменения в расписании вследствие появления срочной работы 21 привели к значительному перераспределению последовательности проведения работ на всех операциях. Причина таких существенных изменений заключается не только в сдвиге работ во времени, но также и в необходимости нового группирования работ по их видам.

Корректировка расписания на 16.09	
Вариант 1	Машина 1: (12; 14;18; 18; 18;)
Вариант 1	Машина 2: 8; 21; 9; 11; 13; 17; (20; 20;) 19; 15; 17; (16; 16;)
Вариант 1	Машина 3: (12; 12; 14;18;) 16; 18;
Вариант 1	Машина 4: 11; (11; 17;) 16;
Вариант 1	Машина 5: 8; 21; 9; (13; 20; 20;) 19; 15; 17; 18;
Вариант 1	Машина 6: 5; (8; 9;) (11; 17;) 19; (12; 14;18;) 17; (16; 16;)
Вариант 1	Машина 7: 3; 21; 11; (13; 20; 20;) (10;12; 12;) 15; (18; 18;)
Вариант 1	Машина 8: (6;15;) (5; 3;) 21; (8; 9;) 11; 13; 11; 20; 17; 20; 19; (10;12; 12; 12;) 15; (14;18;) 17; 16; (18; 18;) 16;
Остаток расписания от 15.09	
Вариант 1	Машина 1: (13;20; 20;) 16; (12; 14; 18; 18;) 16; 19;
Вариант 1	Машина 2: 8; (11;17;) 15; 20; 17; 9;
Вариант 1	Машина 3: 12; (11;17;) (12; 14; 18; 18;) 16;
Вариант 1	Машина 4: 11; 16; 19;
Вариант 1	Машина 5: 8; (13;20; 20;) 15; 20; 17; 9;
Вариант 1	Машина 6: 5; (10;12; 12;) 8; (11; 11;17;) 15; (18; 18;) 16; 17;
Вариант 1	Машина 7: 3; (13;20; 20;) 16; 12; 20; 14; (19; 9;)
Вариант 1	Машина 8: (6;15;) 5; (10;12; 12;) (3; 8;) (13;20; 20;) 11; 16; (11;17;) 12; 20; 15; (14; 18; 18;) 16; (19; 9;) 17;

Рис. 9.62 Сравнение расписания после корректировки с первоначальным расписанием

Новая работа 21 имеет вид 5, совпадающий с видом работ 13 и 20 (рис. 9.59). Однако объединение этих работ в одну группу оказалось нецелесообразным, т.к. они требуются к существенно разным моментам времени.

#### 9.4.6 Моделирование расписания

На листе 3 представлены варианты расчетов расписаний для исходного задания, совпадающего с заданием на рис. 9.39, при различных значениях ограничителей ветвления. На первом шаге моделирования установлены значения  $\alpha = 0,1$ ,  $B1 = 400$ ,  $B2 = 40$  и  $B3 = 0,01$ , количество вариантов равно 1, а длительность решения составляет 11 сек. Наименьший коэффициент запаздывания  $Kz$ , равный 0,4, наблюдается при  $\alpha = 0,1$ ,  $B1 = 100$ ,  $B2 = 10$  и  $B3 = 0,02$ , при этом среднее запаздывание  $Tc$  составляет 23,4 часов.

На листе 4 приведен пример моделирования расписаний, содержащий 36 работ. Результаты моделирования показаны на рис. 9.63. Как видно из этого рисунка, величина коэффициента запаздывания с ростом количества работ изменяется незначительно.

В то же время, абсолютные значения полной продолжительности планируемого набора работ и наибольшего запаздывания быстро нарастают. Величина среднего запаздывания до количества работ, равного 30, мало меняется, но затем также быстро увеличивается. Поэтому это значение имеет смысл считать критическим.



**Рис. 9.63** Параметры расписаний для разного набора работ: 1 – полная продолжительность набора работ; 2 – коэффициент запаздывания, умноженный на 100; 3 – наибольшее запаздывание; 4 – среднее запаздывание

## Расписания для универсального производства

10.1 Введение .....	239	10.3 Расписания при выпуске комплектов деталей на склад ...	253
10.2 Расписания при заданном наборе работ .....	240	10.3.1 Исходные данные задачи .....	254
10.2.1 Исходные данные задачи .....	242	10.3.2 Работа с программой .....	257
10.2.2 Работа с программой .....	244	10.3.3 Анализ результатов планирования .....	258
10.2.3 Анализ результатов планирования .....	245	10.3.4 Листинг основной части программы .....	262
10.2.4 Листинг основной части программы .....	247	10.3.5 Перепланирование расписания .....	269
10.2.5 Перепланирование расписания .....	250	10.3.6 Моделирование расписания .....	271
10.2.6 Моделирование расписания .....	252		

### 10.1 Введение

В универсальном производстве последовательность операций при выполнении каждой работы различна. В то же время набор возможных операций ограничивается возможностями парка машин, находящегося в распоряжении производственного подразделения. Задача оперативного (как правило, ежедневного) планирования состоит в составлении оптимального расписания работ в подразделении на планируемый период. Этот период обычно охватывает несколько предстоящих рабочих дней, поэтому каждый последующий план опирается на ранее разработанные планы и представляет собой их корректировку и дополнение.

Частота получения заказов и их состав нестабильны, а иногда даже носят случайный характер. Размеры продукции по одному заказу обычно невелики, тогда как номенклатура продукции может иметь большое количество модификаций. В таких условиях предприятия с универсальным производством часто идут по пути изготовления «в запас» довольно больших партий деталей, которые обеспечивают выполнение возможных заказов в течение нескольких месяцев. При этом упрощается производственное планирование, экономятся затраты на переналадки и облегчается контроль качества продукции. Однако этот путь приводит к серьезному увеличению производственного цикла и большим незавершенным запасам одних и нехватке других, и более нужных, деталей. Более перспективным является групповое планирование, при котором размеры каждой партии деталей устанавливаются в соответствии с имеющимися (или предполагаемыми) заказами на горизонте планирования.

Количество возможных вариантов плана в принципе чрезвычайно велико, однако оно существенно уменьшается из-за реально существующих ограничений. Прежде всего, технологический процесс обработки довольно жестко определяет возможность варьирования оборудованием для выполнения операций. Кроме того, по организационным и психологическим причинам, как правило, операция, ранее начатая на машине, не должна прерываться. Наконец, при составлении плана приходится учитывать техническое состояние оборудования, наличие оснастки и квалифицированного персонала.

Здесь полагается, что набор возможных операций по изготовлению деталей фиксирован, и для каждой операции можно использовать несколько машин одинакового назначения. Последовательность операций для изготовления детали к моменту составления расписания известна, но может отличаться для каждой детали в любом порядке.

Разработка группового расписания для многостадийной обработки на машинах различного назначения, на которых возможно параллельное изготовление различных деталей, является очень сложной задачей, поскольку здесь одновременно необходимо распределять партии деталей по машинам и объединять партии деталей, необходимые для разных заказов, в группы на всех стадиях обработки.

Естественно, что при составлении расписания необходимо руководствоваться некоторыми критериями оптимизации, определение которых не очевидно. Поскольку причиной появления групповых способов обработки является стремление найти рациональный компромисс между высоким уровнем (своевременностью) выполнения заказов и низкой стоимостью производства, необходимость одновременного выполнения этих требований при планировании представляет собой т.н. «дилемму планирования», решение которой в принципе не может быть получено в однокритериальной постановке.

Динамический метод группового планирования позволяет предложить пользователю набор из нескольких вариантов решений для окончательного выбора. При этом для оценки качества планирования используются два критерия: критерий средней полезности заказов и критерий относительных издержек на горизонте планирования.

## 10.2 Расписания при заданном наборе работ

Положим, что на участок (цех) в любой последовательности поступают различные работы, прибытие которых запланировано в различное время  $r_i$ . При этом каждая  $i$ -ая работа относится к одному из  $S$  возможных видов и содержит  $R_i$  операций. Задание дат окончания работ со сроком выполнения  $d_i$  характерно для производственной стратегии «под заказ». Ниже перечислены основные допущения для планирования.

- а) Каждая работа включает установленное количество последовательно выполняемых операций.
- б) Для каждой работы может быть установлен свой весовой коэффициент.
- в) Время поступления каждой работы известно.
- г) Каждая операция не может одновременно проводится более, чем на одной машине.
- д) Каждому виду операций соответствует несколько одинаковых машин определенного вида.
- е) Время обработки на каждой операции известно и детерминировано.
- ж) Время наладки зависит от вида работы и семейства машин и не зависит от последовательности работ на одной машине.
- з) Время передачи с операции на операцию известно и одинаково для всех операций.
- и) В начальный момент времени известно, какая операция выполняется на каждой машине, и в какой момент времени она будет закончена.

В соответствии с известным трехэлементным способом классификации расписаний рассматриваемая задача имеет вид

$$FJ|prec, r_i, d_i, s_{jm}|U, \bar{V}, \quad (10.1)$$

где  $FJ$  – обозначение гибкого универсального производства; слово *prec* в 10.1 отражает требование последовательного выполнения операций для каждой работы;  $s_{jm}$  представляет собой длительность наладки машины  $m$  на операцию для работы вида  $j$ .

В формуле 10.1 есть две целевых функции, причем их одновременное улучшение возможно только в определенных пределах:  $U$  – относительные затраты для выполнения всех работ;  $\bar{V}$  – средняя полезность заказов за время выполнения расписания. В этой задаче не ставится каких-либо ограничений на размеры работ на любой операции, причем каждая работа выполняется как одна партия деталей.

Для решения задачи 10.1 целесообразно воспользоваться методом, основанным на многокритериальном «жадном» подходе (Capon and Jeannot, 2011). Для этой цели построим дерево поиска не доминируемых решений, используя следующий алгоритм, являющийся вариантом алгоритма в главе 3.

### ШАГ 1 Расчет функций полезности в начальный момент планирования

Положим номер уровня  $l = 0$ ; начальная функция издержек  $U_0 = 0$ ; начальная полезность заказов  $V_0$  определятся по формуле 3.7; количество узлов  $Z_0 = 1$ .

### ВНЕШНИЙ ЦИКЛ

#### ШАГ 2 Определение возможных операций на следующих уровнях

Для каждого узла  $z$  построенного дерева на уровне  $l$  устанавливаются возможные операции и определяются значения  $g_{ijz}$  при помощи формул 3.28.

### СРЕДНИЙ ЦИКЛ

#### ШАГ 3 Определение необходимой машины на следующих уровнях

Для каждой  $k$ -ой операции, которая возможна к моменту  $C_{iz}$ , и не является выполненной ранее, определяется необходимое семейство машин  $f$ .

### ВНУТРЕННИЙ ЦИКЛ

#### ШАГ 4 Расчет функций полезности на следующих уровнях

Для каждой  $m$ -ой машины, относящейся к виду  $f$ , с учетом момента ее возможного освобождения, рассчитываются значения  $U_{l+1,z,k,m}$  и  $\bar{V}_{l+1,z,k,m}$  по формулам 3.27 и (3.20, 3.26).

### КОНЕЦ ВНУТРЕННЕГО ЦИКЛА

### КОНЕЦ СРЕДНЕГО ЦИКЛА

### ШАГ 5 Определение доминируемых узлов дерева

Если уровень  $l + 1$  не является последним, то для доминирования на  $l + 1$ -ом уровне возможного узла  $y$  дерева над возможным узлом  $x$  необходимо, чтобы соблюдались неравенства (3.34, 3.35)

$$U_{l+1,y} \leq U_{l+1,x}, \bar{V}_{l+1,y} \Rightarrow \bar{V}_{l+1,x} \text{ и } g_{l+1,y} < g_{l+1,x}$$

причем первое или второе неравенство должно быть строгим.

Иначе: для доминирования на последнем уровне  $l + 1$  необходимо, чтобы

$$U_{l+1,y} \leq U_{l+1,x}, \bar{V}_{l+1,y} \geq \bar{V}_{l+1,x}$$

**ШАГ 6** Переход на новый уровень или окончание работы программы

ЕСЛИ уровень последний (выполнены все операции), ТО окончание работы.

 ИНАЧЕ Увеличение номера уровня  $l = l + 1$  и переход на ШАГ 2.

**КОНЕЦ ВНЕШНЕГО ЦИКЛА**

Для расчета расписания используется компьютерная программа, работающая на основе функций полезности и представляющая собой макрос на языке VBA для электронной книги MS Excel, результаты выполнения записываются листах и формах книги.

**10.2.1 Исходные данные задачи**

Исходные данные для составления расписания записываются на листе MS Excel электронной книги MBook10.xls, состоящей из четырех листов. На листе 1 в табл. \$A\$5:\$F\$24 находится задание, состоящее из двадцати работ шести различных видов, которое приведено на рис. 10.1. Работы выполняются в различном порядке на пяти операциях, для чего на участке установлены 9 машин.

Как видно из рис. 10.1, работа 1 должна была закончиться на 1 календарный день раньше планируемого начального момента, т.е. имеет место начальное запаздывание. Последующие

Обозначение (№ работы)	Работы		Вид работ	Весовой коэффициент	Отметка выполнения работ
	Требуемый календарный день готовности и после начала	Ожидаемый календарный день поступления после начала			
1	-1	0	1	1	1
2	1	0	2	1	1
3	2	0	4	2	1
4	2	0	3	3	1
5	2	0	1	1	1
6	2	0	5	1	1
7	3	0	3	1	-1
8	3	0	5	1	1
9	3	0	2	1	-1
10	3	0	6	1	-1
11	3	1	3	1	-1
12	4	1	4	1	-1
13	4	2	2	1	-1
14	4	2	1	1	-1
15	4	2	3	1	-1
16	5	2	6	1	-1
17	5	2	1	1	-1
18	5	3	4	1	-1
19	5	3	5	1	-1
20	5	3	2	1	-1

**Рис. 10.1** Исходное задание для гибкого универсального производства

работы должны быть исполнены в течение пяти календарных дней после начала. Для каждой работы может быть установлен весовой коэффициент, повышающий ее важность, причем обычное значение коэффициента равно 1. Например, для работы 3 и работы 4 установлен весовой коэффициент, равный 2 и 3 соответственно. Если для соответствующей работы началась хотя бы первая операция, в последней графе записывается значение 1, в противном случае записывается значение -1. В том случае, когда выполнение работы полностью заканчивается значение в последней графе равно 0.

На рис. 10.2 приведен фрагмент списка деталиеопераций для четырех из 20 работ. Каждая операция может быть проведена на машинах определенного семейства и имеет соответствующую трудоемкость. Ожидаемый момент выполнения операции в последнем столбце таблицы равен нулю, если операция уже закончена. Если операция начата, но не закончена, то в этой графе приводится ее ожидаемое значение в рабочих часах после момента начала выполнения плана; если операция не начиналась, то в этой графе проставляется величина -1.

В начальный момент времени для каждой машины указывается обозначение выполняемой работы и ожидаемый момент освобождения в календарных часах. На листе Excel приведена матрица норм времени в часах на наладку каждой машины на один из шести возможных видов работ. Календарный график предусматривает две восьмичасовые смены и пятидневную рабочую неделю

На листе 2 приведен возможный вариант перепланирования этого задания, на листе 3 проводится моделирование по различным параметрам. На листе 4 приведен пример моделирования с целью нахождения рационального горизонта планирования.

Обозначение (№ работы)	Деталиеоперации		Трудоемкость, час	Ожидаемый момент выполнения в рабочих часах
	Номер операции	Номер машин группы		
1	1	1	1,6	0
1	2	2	2,4	0
1	3	4	4	0
1	4	5	0,8	1
2	1	1	1,6	0
2	2	3	2	0
2	3	4	2	2
3	1	2	2	0
3	2	1	1,2	-1
3	3	4	4	-1
3	4	3	1,2	-1
3	5	5	2,8	-1
4	1	1	1,6	0
4	2	3	2	-1
4	3	4	1,2	-1

Рис. 10.2 Фрагмент списка деталиеопераций

## 10.2.2 Работа с программой

Для работы с программой планирования в MS Excel устанавливается соответствующий рабочий лист, например, лист 1 и осуществляется запуск макроса. При выборе опции «без моделирования», система сообщает о последней дате планирования и предлагает одну из двух возможностей – подготовку планирования с новой датой или повторение расчета с последней датой.

В форме «Ввод данных» задаются основные параметры процесса. Система автоматически рассчитывает загрузку участка (по включенным машинам) и выдает соответствующее сообщение. По окончании расчета все возможные и недоминируемые варианты выводятся на лист. В данном примере таких вариантов 5, два из которых показаны на рис. 10.3.

В каждом варианте работы сгруппированы по видам, а группы выделены скобками. Внутри группы последовательность работ не обязательно совпадает с порядком их номеров, поскольку работы в одной группе могут иметь различную трудоемкость и отличаться по времени готовности к операции. Если резерв времени выполнения всех работ в одной группе положительный, то система иногда рекомендует выполнять сначала работы с меньшей трудоемкостью с тем, чтобы понизить суммарную длительность производственного цикла.

Недоминируемые варианты	
Вариант 1	Машина 1: 12/1, 16/1, 14/1, 18/1, 20/1
Вариант 1	Машина 2: 3/2, 10/1, 13/1, (15/2, 11/2)
Вариант 1	Машина 3: (11/1, 15/1), 17/2, 12/4, 15/4, 13/3, 10/3, 19/2
Вариант 1	Машина 4: (7/1, 4/4, 7/3), (8/2, 6/2), 9/1, 18/3, 20/3
Вариант 1	Машина 6: (4/2, 7/2), 17/1, (12/2, 3/4), 17/3, (8/2, 13/2), (10/2, 16/2), (8/3, 19/1), 18/2, 10/5, 16/5, 20/4
Вариант 1	Машина 7: 4/3, 6/3, 15/3, 17/4, 11/4
Вариант 1	Машина 8: (3/3, 12/3), 8/4, 20/2, 19/3
Вариант 1	Машина 9: 5/5, 3/5, 14/2, 6/4, 11/3, 9/3, 12/5, (10/4, 16/3), 8/5, 17/5, 18/4
Вариант 2	Машина 1: 12/1, 18/1, 14/1, 18/1, 20/1
Вариант 2	Машина 2: 3/2, 10/1, 13/1, (15/2, 11/2)
Вариант 2	Машина 3: (11/1, 15/1), 17/2, 18/2, 28/3
Вариант 2	Машина 4: (7/1, 4/4, 7/3), (8/2, 6/2), (9/1, 13/3), 10/3, 15/4, (12/4, 18/3)
Вариант 2	Машина 6: (4/2, 7/2), 17/1, (12/2, 3/4), 17/3, (8/2, 13/2), (10/2, 16/2), (8/3, 19/1), 18/2, 20/4, 10/5, 15/5
Вариант 2	Машина 7: 4/3, 6/3, (15/3, 11/4)
Вариант 2	Машина 8: (3/3, 12/3), (8/4, 18/3), 17/4, 20/2
Вариант 2	Машина 9: 5/5, 3/5, 14/2, 9/3, 11/3, (10/4, 16/3), (8/5, 6/4), (12/5, 18/4), 17/5

Рис. 10.3 Фрагмент результатов работы программы на листе 1

Коэффициент плановой загрузки: 0,3	
Группа 1:	0,19
Группа 2:	0,27
Группа 3:	0,49
Группа 4:	0,26
Группа 5:	0,48
Рекомендуемые варианты: по методу Сэвджа - вариант 3, по методу Гурвица - вариант 3	
Показатели вариантов расписания:	
относительные затраты на наладку набора работ $U$ ; средняя полезность заказов $V$ ;	
коэффициент неравномерности загрузки $K_n$ ; коэффициент группирования $K_g$ ; коэффициент запаздывания $K_z$ ;	
полная длительность выполнения $С_{max}$ , среднее $T_c$ и наибольшее $T_{max}$ запаздывания в календарных часах	
Начальные значения критериев: $U = 0$ ; $V = 0,863$	
Вариант 1:	$U = 24,562$ ; $V = -1,044$ ; $K_n = 4,3$ ; $K_g = 1,55$ ; $K_z = 0,45$ ; $С_{max} = 131$ ; $T_c = 11,3$ ; $T_{max} = 43,2$
Вариант 2:	$U = 20,562$ ; $V = -1,19$ ; $K_n = 4,4$ ; $K_g = 1,76$ ; $K_z = 0,55$ ; $С_{max} = 143$ ; $T_c = 16,9$ ; $T_{max} = 67,3$
Вариант 3:	$U = 17,562$ ; $V = -1,314$ ; $K_n = 4,3$ ; $K_g = 1,88$ ; $K_z = 0,65$ ; $С_{max} = 184$ ; $T_c = 32,2$ ; $T_{max} = 89,4$
Вариант 4:	$U = 17,375$ ; $V = -1,751$ ; $K_n = 4,3$ ; $K_g = 1,93$ ; $K_z = 0,65$ ; $С_{max} = 249$ ; $T_c = 41,5$ ; $T_{max} = 152,6$
Вариант 5:	$U = 17,375$ ; $V = -1,751$ ; $K_n = 4,3$ ; $K_g = 1,93$ ; $K_z = 0,65$ ; $С_{max} = 249$ ; $T_c = 41,5$ ; $T_{max} = 152,6$
Вариант 5:	$U = 17,375$ ; $V = -1,751$ ; $K_n = 4,3$ ; $K_g = 1,93$ ; $K_z = 0,65$ ; $С_{max} = 249$ ; $T_c = 41,5$ ; $T_{max} = 152,6$

Рис. 10.4 Значения показателей расписания для различных вариантов

По окончании расчета на лист выводятся коэффициенты загрузки по каждой группе машин, а также номера вариантов, рекомендуемые в соответствии с методами Сэвиджа и Гурвица. Кроме того, для всех не доминируемых вариантов выводятся данные о значениях критериев  $U$ ,  $\bar{V}$  (рис. 10.4), а также значения основных показателей расписания: коэффициента неравномерности загрузки  $K_n$ , коэффициентов группирования  $K_g$  и запаздывания  $K_z$ , полной длительности выполнения расписания  $Stax$ , среднего  $T_c$  и наибольшего  $Tmax$  запаздываний.

В приведенном примере группы машины, предназначенные для различных операций, загружены не одинаково. Наибольшая загрузка в 49% наблюдается в группах 3 (машина 6) и 5 (машина 9), наименьшая, равная 19% – в группе 1. Программа автоматически создает расписание, в котором коэффициенты группирования для наиболее загруженных машин заметно выше, чем для остальных машин (рис. 10.3).

### 10.2.3 Анализ результатов планирования

На рис. 10.5 показано расписание для первого полученного варианта, составленное с учетом графика работы цеха. На машинах 1 и 2 первой группы с небольшой загрузкой, составляющей 19% (рис. 10.4), группирование работ по видам практически не предусматривается. Операции на машине 1 запланированы на первый, второй и четвертый календарные дни, а на машине 2 – только на первые два дня.

На машине 4 сначала выполняется операция 1 для работы 7 вида 3, которая затем отправляется на машину 6 для операции 2. В это время на машине 4 без переналадки выполняется операция 4 для работы 4. Затем для проведения операции 3 работа 7 возвращается на машину 4. Наиболее загруженными являются машины 6 и 9, расписание для которых составляется вплоть до пятого календарного дня.

Программа позволяет отследить последовательность выполнения операций для всех работ (рис. 10.6). Здесь в скобках указывается номер машины и, через дробь, номер операции.

В данном случае две работы должны быть выполнены до введения в действие плана на рис. 10.6: для работы 1 заканчивается последняя (четвертая) операция на машине 9, а для работы 2 – третья операция на машине 8. Для работы 5 предусматривается только одна (последняя) операция на машине 9.

Если какая-либо из работ оказывается запланированной заметно позже необходимого срока, для более раннего начала можно воспользоваться увеличенным весовым коэффициентом. В данном примере такой весовой коэффициент используется для работ 2 и 4 (рис. 10.2).

#### План загрузки машин по варианту 1

Машина 1: 9 (12/1) 11,2; 32 (16/1) 32,6; 33,6 (14/1) 35,6; 80 (18/1) 81; 81,5 (20/1) 82,7.  
 Машина 2: 10,5 (3/2) 11,7; 12,7 (10/1) 13,9; 32 (13/1) 33,4; 37 (15/2) 38,8; 38,8 (11/2) 40,4.  
 Машина 3: 9,5 (11/1) 11,5; 32 (15/1) 33; 36,6 (17/2) 37,4; 46,4 (12/4) 81; 82,5 (15/4) 85,9; 87,4 (13/3) 88,2; 89,7 (10/3) 91,3; 93,3 (19/2) 94,3.  
 Машина 4: 10 (7/1) 12; 20,7 (4/4) 21,9; 21,9 (7/3) 32,3; 33,3 (8/2) 35,3; 35,3 (6/2) 36,5; 38 (9/1) 39,2; 95,8 (18/3) 109,2; 110,7 (20/3) 112,7.  
 Машина 6: 9,5 (4/2) 11,5; 16 (7/2) 17,6; 32 (17/1) 32,6; 33,6 (12/2) 34,4; 34,4 (3/4) 35,6; 41,4 (17/3) 43,2; 43,7 (9/2) 44,9; 44,9 (13/2) 47,9; 80,9 (10/2) 83,7; 83,7 (16/2) 84,9; 86,4 (8/3) 88; 88 (19/1) 89,2; 90,2 (18/2) 91,8; 111,2 (10/5) 114; 115,5 (15/5) 118,3; 118,8 (20/4) 128,2.  
 Машина 7: 15,5 (4/3) 16,7; 40,5 (6/3) 41,7; 42,8 (15/3) 45,8; 47,2 (17/4) 82,4; 90,9 (11/4) 93,3.  
 Машина 8: 15,7 (3/3) 19,7; 38,4 (12/3) 42,4; 92 (8/4) 94,4; 95,9 (20/2) 106,7; 108,7 (19/3) 109,7.  
 Машина 9: 9 (5/5) 11,4; 39,6 (3/5) 42,4; 44,4 (14/2) 45,8; 46,8 (6/4) 82,4; 83,9 (11/3) 86,9; 89,9 (9/3) 91,5; 93,5 (12/5) 95,3; 104,8 (10/4) 107,2; 107,2 (16/3) 110,2; 111,2 (8/5) 115,2; 117,2 (17/5) 118; 128 (18/4) 131,4.

Рис. 10.5 План загрузки машин

План обработки по варианту 1	
Работа 1:	
Работа 2:	
Работа 3:	10,5 (2/2) 11,7; 15,7 (8/3) 19,7; 34,4 (6/4) 35,6; 39,6 (9/5) 42,4;
Работа 4:	9,5 (6/2) 11,5; 15,5 (7/3) 16,7; 20,7 (4/4) 21,9;
Работа 5:	9 (9/5) 11,4;
Работа 6:	35,3 (4/2) 36,5; 40,5 (7/3) 41,7; 46,8 (9/4) 82,4;
Работа 7:	10 (4/1) 12; 16 (6/2) 17,6; 21,9 (4/3) 32,3;
Работа 8:	33,3 (4/2) 35,3; 86,4 (6/3) 88; 92 (8/4) 94,4; 111,2 (9/5) 115,2;
Работа 9:	38 (4/1) 39,2; 43,7 (6/2) 44,9; 89,9 (9/3) 91,5;
Работа 10:	12,7 (2/1) 13,9; 80,9 (6/2) 83,7; 89,7 (3/3) 91,3; 104,8 (9/4) 107,2; 111,2 (6/5) 114;
Работа 11:	9,5 (3/1) 11,5; 38,8 (2/2) 40,4; 83,9 (9/3) 86,9; 90,9 (7/4) 93,3;
Работа 12:	9 (1/1) 11,2; 33,6 (6/2) 34,4; 38,4 (8/3) 42,4; 46,4 (3/4) 81; 93,5 (9/5) 95,3;
Работа 13:	32 (2/1) 33,4; 44,9 (6/2) 47,9; 87,4 (3/3) 88,2;
Работа 14:	33,6 (1/1) 35,6; 44,4 (9/2) 45,8;
Работа 15:	32 (3/1) 33; 37 (2/2) 38,8; 42,8 (7/3) 45,8; 82,5 (3/4) 85,9; 115,5 (6/5) 118,3;
Работа 16:	32 (1/1) 32,6; 83,7 (6/2) 84,9; 107,2 (9/3) 110,2;
Работа 17:	32 (6/1) 32,6; 36,6 (3/2) 37,4; 41,4 (6/3) 43,2; 47,2 (7/4) 82,4; 117,2 (9/5) 118;
Работа 18:	80 (1/1) 81; 90,2 (6/2) 91,8; 95,8 (4/3) 109,2; 128 (9/4) 131,4;
Работа 19:	88 (6/1) 89,2; 93,3 (3/2) 94,3; 108,7 (8/3) 109,7;
Работа 20:	81,5 (1/1) 82,7; 95,9 (8/2) 106,7; 110,7 (4/3) 112,7; 118,8 (6/4) 128,2;

Рис. 10.6 План обработки

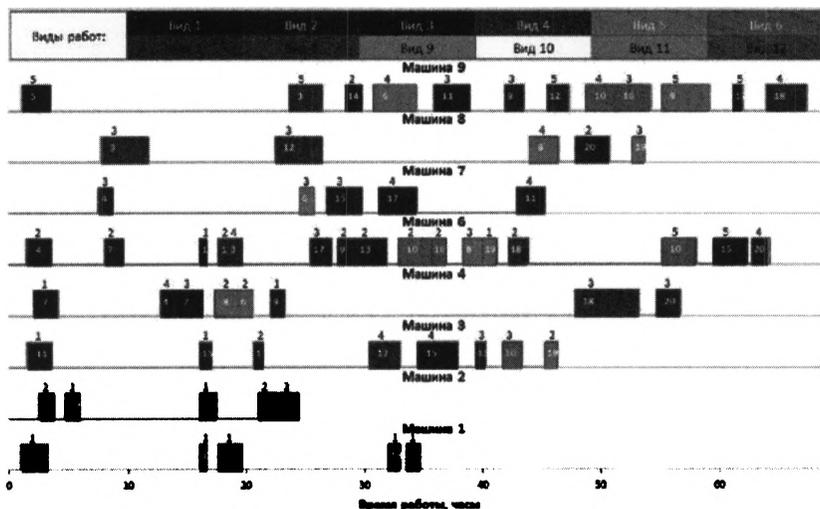
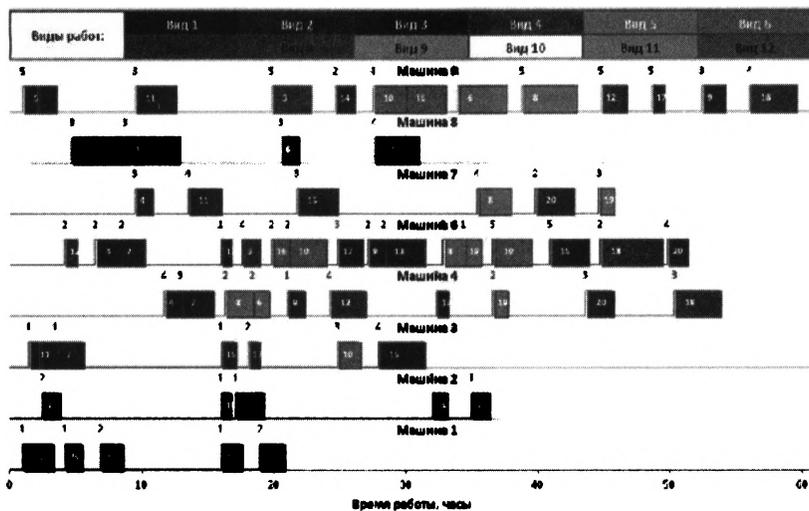


Рис. 10.7 Диаграмма Ганта для нормы времени между операциями в 4 часа

Система обеспечивает вывод расписания работы машин в виде диаграммы Ганта (рис. 10.7). Номер работы указывается на поле прямоугольника диаграммы, сверху записывается номер текущей операции.

Из диаграммы наглядно видно, как происходит группирование, например, работы вида 1 закрашены черным цветом, вида 2 – закрашены коричневым цветом, вида 3 – синим цветом. Диаграмма Ганта хорошо иллюстрирует влияние трудоемкости работ на последовательность их



**Рис. 10.8** Диаграмма Ганта для нормы времени между операциями в 1 час

выполнения. Горизонтальный размер прямоугольника, описывающего каждую работу, соответствует длительности ее непосредственного выполнения.

В данном случае плотность выполнения работ невелика, что связано большим разнообразием в последовательности операций для разных работ. Такой пример выбран для иллюстрации возможности использования данного метода в сложных условиях, из-за чего принято довольно большое значение нормативного времени на передачу между операциями, равное 4 часа. На машинах в начале планирования появляются отдельные обособленные работы; машины 6 и 9 загружены достаточно равномерно.

На рис. 10.8 показана диаграмма Ганта при норме межоперационной нормы времени, равной одному часу. В этом случае плотность и равномерность загрузки, разумеется, существенно улучшаются.

### 10.2.4 Листинг основной части программы

На каждом уровне построения дерева расписания используются 6 основных массивов: *UStage()*, *VStage()*, *ParStage()*, *CompStage()*, *NPStage()*, *Tk()*, которые имеют назначение, совпадающее с назначением аналогичных массивов в главе 5. Поскольку для каждой операции могут применяться несколько параллельных машин, приходится использовать дополнительный массив *FStage()*. Соответственно для дальнейшего построения ветвей дерева путем перезаписи значений параметров недоминируемых узлов используются массивы *U()*, *V()*, *Par()*, *Comp()*, *NP()*, *Commen()*, *FComp()*. Программа автоматически переносит данные с листа в переменные и массивы.

На рис. 10.9 приведена программа наполнения массивов деталиеопераций. Значения массива *RD()* поступления деталиеопераций в календарных часах устанавливаются по моментам поступления заготовок или по моментам окончания предыдущих операций. Для каждой опера-

```

For i = 1 To BetaD
desD(i) = Cells(Alfa, Gamma).Value 'наполнение массивов деталейопераций '
desD(i) = Determ(Beta, desD(i)) 'обозначение работы '
numD(i) = Cells(Alfa, Gamma + 1).Value 'номер строки списка работ
machD(i) = Cells(Alfa, Gamma + 2).Value 'номер деталиопераций'
p(i) = Cells(Alfa, Gamma + 3).Value 'группа машин для текущей деталиопераций'
Wip(machD(i)) = Wip(machD(i)) + p(i) 'трудоемкость деталиопераций'
exD(i) = Cells(Alfa, Gamma + 4).Value 'накапливавшаяся трудоемкость в группе машин'
BetaG(machD(i)) = BetaG(machD(i)) + 1 'накапливавшееся количество деталиопераций для группы машин'
Job = desD(i) 'номер строки списка работ, к которой относится операция'
If numD(i) = 1 Then 'для первой операции'
RD(i) = r(Job) 'момент поступления деталиоперации равен моменту поступления работы'
Else 'для операций после первой
If desD(i) = desD(i - 1) Then 'если работа в последующей деталиоперации и предыдущей сохраняется
If exD(i - 1) > 0 Then 'если предыдущая деталиоперация в работе, но не закончена'
RD(i) = r(Job) + Tn + exD(i - 1) + Tn
'момент поступления по окончании пред. операции плюс межопер. время '
Else 'операция возможна сразу (0) или невозможна (-1)'
If exD(i - 1) = 0 Then 'операция возможна сразу
RD(i) = r(Job) + Tn 'начало операции возможно в начале рабочего дня
Else 'операция невозможна
RD(i) = exD(i - 1) '
End If
End If
End If
End If
Alfa = Alfa + 1 'переход к следующей деталиоперации'
Next i
    
```

Рис. 10.9 Организация массивов деталиопераций

ции определяется значение еще не выполненной трудоемкости  $pav$  (рис. 10.10) и необходимых моментов окончания каждой операции  $dDet$  (рис. 10.11).

После подготовки исходных массивов рассчитываются значения исходных значений критериев в корне дерева. Величина относительных затрат в корне  $U_0 = 0$ , функция полезности заказов  $\bar{V}_0$  определяется с помощью функций  $Napr2()$  и  $Napr1()$ . Расчет основных параметров узлов первого уровня по всему количеству заказов производится в двойном цикле: внешний цикл осуществляется по деталиоперациям, а внутренний цикл – по включенным машинам (рис. 10.12). Затем производится отсечение узлов по критериям и перенос в полные массивы недоминируемых узлов дерева решений.

На последующих уровнях  $intY$  построения дерева решений все этапы программы первого уровня повторяются с существенными изменениями. В каждом узле ветвления  $intZ$  запоминается расчетная полезность в созданном узле  $sngVz$ , номер машины в узле  $intMz$ , фиктивной расчетной длительности в узле  $sngCz$ . Кроме этого, для каждой машины  $i$  определяется теку-

```

For i = 1 To BetaD
If exD(i) <> 0 Then 'определение полной оставшейся трудоемкости работ'
Job = desD(i) 'определение текущего номера строки списка работ по обозначению'
If exD(i) = -1 Then 'для не начинавшихся деталиопераций'
pav(Job) = pav(Job) + p(i) 'накопление оставшейся трудоемкости'
Else 'для начинавшихся деталиопераций'
pav(Job) = pav(Job) + exD(i) 'накопление оставшейся трудоемкости'
End If
End If
Next i
    
```

Рис. 10.10 Определение невыполненной трудоемкости

```

For i = 1 To BetaD 'определение необходимых моментов окончания и начала выполнения детали операций'
Job = desD(i) 'обозначение строки работы, к которой относится операция'
If exD(i) <> 0 Then 'если операция не выполнена'
If exD(i) = -1 Then 'для не начинавшихся детали операций'
Exes = p(i) 'оставшаяся трудоемкость детали операции'
Else 'для начинавшихся детали операций'
Exes = exD(i) 'оставшаяся трудоемкость детали операций'
End If
dDet(i) = dd(Job) - rav(Job) + ravs(Job) + Exes 'необходимый момент окончания детали операции'
qs(i) = dDet(i) - Exes 'необходимый момент начала детали операции'
ravs(Job) = ravs(Job) + Exes 'последовательно накапливавшаяся необходимая трудоемкость работы'
If Cells(1, "Y").Value = 1 And d(Job) <= HBot Then
'если при моделировании срок выполнения работы в календарных часах меньше горизонта планирования
Tr = Tr + ravs(Job) 'накопленная трудоемкость на горизонте планирования
End If
End If
Next i
    
```

Рис. 10.11 Определение необходимых моментов окончания детали операций

```

n = 0
Kappa = 0
For i = 1 To BetaD 'цикл по детали операциям'
Job = desD(i) 'обозначение работы, к которой относится операция'
If exD(i) >= 0 Then 'выключение выполненных и выполняемых операций'
aJ(i) = 0
Kappa = Kappa + 1 'количество выполненных операций до начала планирования'
Else
If RD(i) >= 0 Then 'отбор возможных операций'
aJ(i) = 0.5 'строится узел первого уровня с i-ой выполняемой работой'
For J = 1 To Nmach 'по всем машинам
If MetkM(J) = 1 And machD(i) = MachG(J) Then 'для включенных машин необходимой группы
n = n + 1 'номер текущего узла первого уровня'
Tk(n) = Application.Max(RD(i), Cl(J)) 'готовность машин и заготовки
If Vid(Job) <> Vid(J) Then 'если необходима начальная переналадка
UStage(n) = Uzak(Job, J) 'затраты на наладку'
Tk(n) = Calend(Tk(n), s(Vid(Job), J), J, 1) 'учет календарного графика
End If
'начало детали операции равно моменту освобождения машин плюс время наладки'
CompStage(n) = Calend(Tk(n), p(i), J, 2) 'момент окончания работы в календарных часах
If CompStage(n) = 0 Then 'если не определен момент окончания работы
MsgBox " недостаточен рабочий горизонт "
Exit Sub
End If
ParStage(n) = 0 'в узле родительский уровень 0'
MPStage(n) = 1 'в узле номер строки равен номеру в цикле'
VStage(n) = (VO * Cl(J) + Vzak(BetaD, i, J, Cl(J), Tk(n), CompStage(n))) / CompStage(n)
MachStage(n) = J 'машина в узле'
End If
Next J
aJ(i) = 1 'возврат метки работы на невыполнение'
End If
End If
Next i
    
```

Рис. 10.12 Расчет параметров узлов первого уровня

шая выполняемая работа  $PMach(i)$  и ее момент окончания  $Cl(i)$ . После каждой выполненной детали операции определяется момент ее готовности  $RD$  для выполнения следующей операции с учетом календарного графика работы цеха (рис. 10.13).

```

For i = 1 To BetaD 'начальная установка массивов aJ и bJ для всех детали операций'
If exD(i) >= 0 Then 'если детали операция начата или выполнена'
aJ(i) = 0 'метка ставится на выполнение'
bJ(i) = exD(i) 'момент выполнения по текущему значению'
Else 'если детали операция не начата'
aJ(i) = 1 'начальная установка меток работ на невыполнение'
bJ(i) = 0 'начальное значение момента выполнения'
End If
Next i
k = TreeStage(intZ) 'номер последнего узла'
Do Until k = 0
aJ(NP(k)) = 0 'метки выполненной работы в узлах до корня цепочки'
bJ(NP(k)) = Comp(k) 'заполнение массива окончания детали операций в узлах до корня цепочки
k = Par(k) 'переход по цепочке'
Loop
For i = 1 To BetaD 'определение моментов готовности детали операций'
If numD(i) > 1 Then 'для операций с номером больше 1'
If exD(i) = -1 And desD(i) = desD(i - 1) Then
'если работа в последующей детали операции и предыдущей сохраняется'
If aJ(i - 1) = 0 Then 'если предыдущая детали операция выполнена'
RD(i) = Calend(bJ(i - 1), Tm, 1, 1)
'момент поступления по окончании предыдущей операции плюс межоперационное время'
Else 'если предыдущая детали операция не выполнена'
RD(i) = -1
'поступления нет'
End If
End If
Else
Job = desD(i) 'номер строки списка работ, к которой относится операция'
RD(i) = Calend(r(Job), 0, 1, 1) 'момент поступления работы с учетом календарного графика'
End If
Next i
    
```

Рис. 10.13 Определение возможных моментов поступления на следующую операцию

Остальные параметры для узлов последующих уровней определяются аналогично параметрам первого уровня. Отсечение узлов по критериям и перенос в полные массивы недоминируемых узлов дерева решений также производится аналогично узлам первого уровня.

## 10.2.5 Перепланирование расписания

Рассмотрим пример перепланирования задания, первоначально имеющего вид, приведенный на листе 1 в книге MBook10.xls. Как было указано в п. 10.2.1. задание на 15.09.16 8:00 состоит из 20 работ шести видов. В случае, показанном на календарном графике, в течение первого и второго рабочего дня планируются две 8-часовые рабочие смены. Следующий календарный день выходной, после которого опять планируется двухсменная работа.

Поскольку продолжительность первого рабочего дня в данном случае составляет 16 часов, при работе в точном соответствии с расписанием, в течение дня (до момента 24 часа) на первой машине, например, должна быть полностью выполнена операция 1 для работы 12 (рис. 10.5). Аналогичная ситуация имеет место и на других машинах. Положим, что к моменту окончания первого рабочего дня появилась срочная работа 21 вида 3 с требованием немедленного выполнения. В такой ситуации требуется перепланирование расписания, начиная со следующего рабочего дня.

Для корректировки расписания скопируем лист 1 на лист 2, очистим этот лист от результатов предыдущего расчета, введем отметки последних выполненных операций на момент начала нового планирования, а также запишем строку 21 нового задания (рис. 10.14). Как видно из рис. 10.14, для нескольких работ (1, 2, 4, 5) выполнены все необходимые операции, и они должны быть исключены из расписания.

В работах 3, 6, 7, 10, 11 и 12 в течение первого дня запланированы различные операции. Например, для работы 3 выполняются операции 2 и 3 (рис. 10.6), для работы 6 заканчивается операция 1, для работы 7 должны быть выполнены операция 1 и 2, а также начата операция 3 и т.д.

Для подготовки нового расписания в таблице состояния машин необходимо указать дату этого нового состояния. Кроме того, для каждой машины необходимо указать загруженную работу и ожидаемый момент окончания операции в календарных часах. Для проведения подготовки к перепланированию необходимо сдвинуть календарный график на единицу влево. Затем необходимо указать на использование режима перепланирования и ввести данные о дате перепланирования и границах пересчета исходного задания (рис. 10.15). При пересчете строки законченных работ автоматически удаляются, а даты уменьшаются на одни сутки.

После подготовки к перепланированию, следует провести новый расчет расписания. При вводе данных обязательно необходимо откорректировать границы исходных работ и деталиеопераций. В данном примере система предлагает 1 не доминируемый вариант, результат расчета иллюстрируется графиком Ганта.

Сравним откорректированный план по состоянию на 16.09.16 с остатком плана, составленного в предыдущий день (рис. 10.16). Прежде всего, в новом расписании приоритетной является новая срочная работа 21. План для машин 1 и 2 изменился: введение новой работы 21 привело к

Обозначение (№ работы)	Работы		Вид работ	Отметка	
	Требуемый календарный день готовности и после начала	Ожидаемый календарный день поступления после начала		Весовой коэффициент	выполнения работы
1	-1	0	1	1	0
2	1	0	2	1	0
3	2	0	4	2	1
4	2	0	3	3	0
5	2	0	1	1	0
6	2	0	5	1	1
7	3	0	3	1	1
8	3	0	5	1	1
9	3	0	2	1	-1
10	3	0	6	1	1
11	3	1	3	1	1
12	4	1	4	1	1
13	4	2	2	1	-1
14	4	2	1	1	-1
15	4	2	3	1	-1
16	5	2	6	1	-1

**Рис. 10.14** Состояние выполнения исходного задания на начало второго дня

Рис. 10.15 Форма подготовки к пересчету работ и деталяеопераций

<b>Новый план на 16.09</b>	
Вариант 1	Машина 1: (21/1, 15/2, 11/2)
Вариант 1	Машина 2: 13/1, 14/1, 16/1, 18/1, 20/1
Вариант 1	Машина 3: 16/1, (8/2, 6/2), (9/1, 13/3), (18/3, 12/4)
Вариант 1	Машина 4: 17/2, 15/4, 10/3, 20/3, 19/2
Вариант 1	Машина 6: 3/4, 17/1, 12/2, 21/2, (10/2, 16/2), (9/2, 13/2), (19/1, 8/3), 18/2, 17/3, 10/5, 15/5, 20/4
Вариант 1	Машина 7: 6/3, (21/3, 15/3, 11/4), 17/4, 20/2
Вариант 1	Машина 8: 12/3, (8/4, 19/3)
Вариант 1	Машина 9: 3/5, 14/2, 9/3, (11/3, 21/4), (8/5, 6/4), (12/5, 18/4), (10/4, 16/3), 17/5
<b>Старый план от 15.09</b>	
Вариант 1	Машина 1: 16/1, 14/1, 18/1, 20/1
Вариант 1	Машина 2: 13/1, (15/2, 11/2)
Вариант 1	Машина 3: 15/1, 17/2, 12/4, 15/4, 13/3, 10/3, 19/2
Вариант 1	Машина 4: 7/3, (8/2, 6/2), 9/1, 18/3, 20/3
Вариант 1	Машина 6: 17/1, (12/2, 3/4), 17/3, (9/2, 13/2), (10/2, 16/2), (8/3, 19/1), 18/2, 10/5, 15/5, 20/4
Вариант 1	Машина 7: 6/3, 15/3, 17/4, 11/4
Вариант 1	Машина 8: 12/3, 8/4, 20/2, 19/3
Вариант 1	Машина 9: 3/5, 14/2, 6/4, 11/3, 9/3, 12/5, (10/4, 16/3), 8/5, 17/5, 18/4

Рис. 10.16 Сравнение откорректированного плана с предыдущим планом

перегруппированию работ и переносу некоторых работ с одной машины на другую. Для машин с последующими операциями изменения имеют незначительный характер.

## 10.2.6 Моделирование расписания

На листе 3 представлены варианты расчетов расписаний при различных значениях ограничителей ветвления. При увеличении значений ограничений  $B_1$ ,  $B_2$  и уменьшении  $B_3$  пучок возможных ветвей дерева расширяется, что приводит к большому значению количества узлов на каждом уровне построения дерева. При  $B_1 = 100$ ,  $B_2 = 5$  и  $B_3 = 0,01$  количество вариантов равно 4, а длительность решения составляет 10 сек., при  $B_1 = 64$ ,  $B_2 = 5$  и  $B_3 = 0,01$  длительность решения уменьшается до 8 сек. В данном случае изменения параметров моделирования в исследованном диапазоне на показатели расписания влияют незначительно.

На листе 4 определяется рациональный горизонт планирования при большом числе работ. На рис. 10.17 приведены графики изменения показателей расписания в зависимости от планового горизонта. Наименьшие ежедневные затраты на переналадку имеют место при горизонте, равном 100 календарных часов, и имеет смысл этот горизонт принять в качестве критического.



**Рис. 10.17** Параметры расписаний для разных горизонтов: 1 – приведенные затраты переналадок за один рабочий день; 2 – полезность выполняемого набора работ; 3 – коэффициент запаздывания.

### 10.3 Расписания при выпуске комплектов деталей на склад

Существенно более сложной, по сравнению с предыдущим примером, является задача комплектно-узлового планирования, когда за плановый период (например, рабочий день) цех должен выпускать заданное количество комплектов деталей различного состава, причем, в состав различных комплектов могут входить детали одного вида. Необходимо также учитывать, что заготовки для деталей каждого семейства могут поступать в цех в различные моменты времени. Задание цеху установленного числа комплектов выпуска является одним из вариантов производственной стратегии «на склад».

Положим, что выполнение операции на каждой из машин возможно только над партией деталей в размерах, не меньших, чем т.н. «техническая партия». Такой партией в данном случае является передаточная (транспортная партия)  $Y_i$ , размер которой зависит от вида детали и номера операции. Будем понимать под термином «работа» проведение всех необходимых операций над такой партией деталей. Будем полагать также, что приоритет всех комплектов одинаков. В таком случае все допущения, сделанные в предыдущем параграфе, кроме допущения б), остаются справедливыми.

Как и раньше, в качестве критериев оптимизации примем относительную стоимость переналадок  $U$  и среднюю полезность заказов  $\bar{V}$ . В этом случае структурная формула задачи примет вид

$$FJ|prec, r_i, B_e, s_{jm}|U, \bar{V}. \quad (10.2)$$

Эта формула отличается от формулы 10.1 тем, что в ней отсутствуют необходимые моменты выполнения работ  $d_i$ , а вместо них вводятся требования о выпуске  $k$  видов комплектов деталей  $B_e$  в каждый рабочий день (суткокомплектов) [Родов и Крутянский, 1964].

Группирование в таком случае заключается в объединении передаточных партий в технологические партии, причем на каждой операции такое объединение может быть различным. Расчетное количество выпуска в день деталей  $i$

$$D_i = \sum_{e=1}^k B_e Q_{ei}, \quad (10.3)$$

где  $Q_{ei}$  – количество деталей вида  $i$  в комплекте типа  $e$ .

Определим для каждого  $i$ -ого вида деталей необходимое на начальный момент времени количество  $p_{0i}$  его производства на горизонте  $h$ :

$$p_{0i} = hD_i - Z_{0i} + Z_{ci}, \quad (10.4)$$

где  $Z_{0i}$  – начальный запас деталей вида  $i$ ,  $Z_{ci}$  – нормативный страховой запас деталей вида  $i$ .  
Необходимое количество технических партий в начале планирования

$$n_{0i} = \frac{p_{0i}}{Y_i}, \quad (10.5)$$

причем первая партия должна быть изготовлена к моменту

$$d_{i1} = \frac{E}{D_i} [Z_{0i} - Z_{ci}] \text{ час}, \quad (10.6)$$

где  $E$  – количество часов в рабочем дне. Необходимый момент окончания  $w$ -ой партии вида  $i$  в рабочих часах определяется по рекуррентной формуле

$$d_{i,w+1} = d_{iw} + \frac{E}{D_i} Y_i. \quad (10.7)$$

Последовательное применение формул (10.4 – 10.7) для определения требуемых моментов выполнения остающихся не запланированных работ позволяет свести описываемую задачу к задаче, изложенной в предыдущем параграфе. Для этого в алгоритме поиска решения для каждой возможной операции на шаге 2 определяется необходимый момент изготовления партии по формуле 10.7.

### 10.3.1 Исходные данные задачи

Исходные данные для составления расписания записываются на листе MS Excel электронной книги MBook11.xls, состоящей из шести листов. На листе 1 в табл. \$A\$5:\$C\$13 находится перечень типов выпускаемых комплектов, приведенный на рис. 10.18. Работы выполняются в различном порядке на пяти операциях, для чего на участке установлены 9 машин.

На рис. 10.19 приведен список деталеопераций. Каждая операция может быть проведена на машинах определенной группы и имеет соответствующую трудоемкость.

В начальный момент времени для каждой машины указывается настройка на вид обрабатываемой детали и ожидаемый момент освобождения в календарных часах (рис. 10.20).

На листе Excel приведена матрица норм времени в часах на наладку каждой машины на один из шести возможных видов деталей. Календарный график предусматривает две восьмичасовые смены и пятидневную рабочую неделю. К началу планирования определяются имеющиеся запасы по всем видам деталей, в котором указываются номера последних выпущенных партий каждого вида (рис. 10.21), а также наименьшие величины передаточных партий.

На рис. 10.22 приведен список находящихся в производстве передаточных партий. Строки списка на рис. 10.22 упорядочены по номерам деталей и по номерам операций, причем для

Тип комплекта	Состав комплектов	
	Номер детали	К-во в комплекте
	1	1
1	4	3
1	3	1
2	5	4
2	1	3
2	6	2
3	3	4
3	4	1
3	2	3

Рис. 10.18 Перечень типов комплектов

Номер детали	Деталеоперации		Трудоемкость на 1 шт., час
	Номер операции	Номер группы машин	
1	1	1	0,2
1	2	2	0,3
1	3	4	0,5
1	4	3	0,1
2	1	2	0,5
2	2	1	0,15
2	3	4	0,2
2	4	3	0,15
2	5	5	0,35
3	1	1	0,2
3	2	3	0,25
3	3	4	0,15
3	4	2	0,15
4	1	2	0,15
4	2	1	0,25
4	3	3	0,2
4	4	4	0,3
4	5	5	0,3
5	1	1	0,2
5	2	2	0,15
5	3	4	0,15
5	4	5	0,45
6	1	1	0,2
6	2	2	0,25
6	3	3	0,2
6	4	4	0,3
6	5	5	0,5

Рис. 10.19 Список деталеопераций

Состояние машин на		15.09.16 8:00								
Машина		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Номер группы машин		1	1	2	2	2	3	4	4	5
Отметка включения машины		1	1	1	0	1	1	1	1	1
Настройка в начале дня на деталь		3	2	0	0	0	0	1	4	2
Момент освобождения в рабочих часах		8	9	0	0	0	0	8	10	9

Рис. 10.20 Состояние машин на момент планирования

Состояние запасов на		15.09.16 8:00					
Деталь		1	2	3	4	5	6
Обозначение		P1	P2	Q1	Q2	R1	R2
Наименьшая передаточная партия в штуках		6	6	6	6	6	6
Текущий запас в штуках		20	15	20	15	6	10
Задолженность по поставкам		0	2	0	0	2	0
Страховой запас		5	5	3	3	2	6
Ожидаемый календарный день поступления заготовок		0	1	0	0	0	0
Номер последней сданной партии выпуска		43	26	16	57	13	45

Рис. 10.21 Состояние запасов деталей

партий с меньшим номером операции устанавливается больший номер партии. Например, в изготовлении одновременно идут две партии деталей вида 3: партия номер 17 на операции 3 и партия 18 на операции 1. Если передаточная партия находится на межоперационном складе, то в графе «Номер машины» проставляется нулевое значение.

План по комплектам составляется в соответствии с их ожидаемым расходом в рабочий день, который может быть дробным (рис. 10.23). Кроме того, комплекты некоторых типов могут иметь преимущества перед другими, что учитывается соответствующими коэффициентами приоритета.

На листе 2 приведен возможный вариант перепланирования этого задания, на листе 3 проводится моделирование по различным параметрам. На листах 4 и 5 приведены примеры моделирования с целью нахождения рационального горизонта планирования и рациональной передаточной партии.

Передаточные партии на		15.09.16 8:00				
	Номер детали	Номер последней выполняемой операции	Номер	Количество	Номер	
			партии	в партии	машины	
	1	3	44	10	7	
	2	2	27	10	2	
	3	1	18	5	1	
	3	3	17	10	0	
	4	4	58	10	8	
	5	3	14	10	0	

Рис. 10.22 Список передаточных партий в производстве

Состояние комплектов на		15.09.16	16.09.16	8.00
	Комплект	1	2	3
	Ожидаемый расход суткокомплектов	5	1,5	3
	Коэффициент приоритета	1	2	1
	Последний сданный номер	25	12	18

Рис. 10.23 Ожидаемый выпуск суткокомплектов

### 10.3.2 Работа с программой

Для работы с программой планирования в MS Excel устанавливается соответствующий рабочий лист, например, лист 1 и осуществляется запуск макроса. При выборе опции «без моделирования», система сообщает о последней дате планирования и предлагает одну из двух возможностей – подготовку планирования с новой датой или повторение расчета с последней датой.

В форме «Ввод данных» задаются основные параметры процесса. Система автоматически рассчитывает загрузку участка (по включенным машинам) и выдает соответствующее сообщение. По окончании расчета все возможные и недоминируемые варианты выводятся на лист. В данном примере таких вариантов только один, который приведен на рис. 10.24.

В каждом варианте работы сгруппированы по видам, а группы выделены скобками. Внутри группы последовательность партий на операциях после первой не обязательно совпадает с порядком их номеров, поскольку разные партии деталей одного вида могут приходиться с предыдущих операций в различном порядке.

Например, для деталей вида 4 последняя выпущенная партия имеет номер 57 (рис. 10.21). Кроме того, в производстве на машине 8 находится партия с номером 58, для которой выполняется операция 4 (рис. 10.22). Первая операция для деталей этого вида (рис. 10.19) может быть выполнена на любой машине группы 2, т.е. на машинах 3, 4 и 5 (рис. 10.20). В данном случае программа запланировала выполнение на машине 3 девяти передаточных партий с номерами от 59 до 67.

Выполнение второй операции для деталей вида 4 должно производиться на машинах группы 1 (рис. 10.19), к которым относятся машины 1 и 2 (рис. 10.20). В данном случае все передаточные партии поступают на машину 2, но порядок их поступления не обязательно сохраняется. Затем выполняется операция 3 на машине 6: сначала обрабатываются три партии, а после перерыва – еще 6 партий. Для операции 4 используются машины 7 и 8. На машине 7 детали 4

#### Недоминируемые варианты

Вариант 1 Машина 1: (3/19/1, 3/20/1, 3/21/1, 3/22/1, 3/23/1, 3/24/1), (2/29/2, 2/30/2, 2/28/2), (4/60/2, 4/62/2, 4/65/2), (5/15/1, 5/16/1)  
 Вариант 1 Машина 2: (1/46/1, 1/46/1, 1/47/1, 1/48/1, 1/49/1, 1/50/1), (4/61/2, 4/62/2, 4/63/2, 4/64/2, 4/66/2, 4/67/2), (5/46/1, 5/47/1)  
 Вариант 1 Машина 3: (1/45/2, 1/46/2, 1/47/2, 1/48/2, 1/49/2, 1/50/2), (4/59/1, 4/60/1, 4/61/1, 4/62/1, 4/63/1, 4/64/1, 4/65/1, 4/66/1, 4/67/1), (5/16/2, 5/15/2), (5/47/2, 5/46/2)  
 Вариант 1 Машина 5: (2/28/1, 2/29/1, 2/30/1), (3/17/4, 3/20/4, 3/21/4, 3/19/4, 3/24/4, 3/23/4, 3/22/4, 3/18/4)  
 Вариант 1 Машина 6: (1/46/4, 1/46/4, 1/44/4, 1/47/4, 1/49/4, 1/48/4), (4/62/3, 4/60/3, 4/61/3), (3/20/2, 3/21/2, 3/19/2, 3/24/2, 3/23/2, 3/22/2, 3/18/2), 1/50/4, (4/65/3, 4/63/3, 4/64/3, 4/59/3, 4/66/3, 4/67/3), (2/27/4, 2/30/4, 2/28/4, 2/29/4), (5/47/3, 5/46/3)  
 Вариант 1 Машина 7: (1/45/3, 1/47/3, 1/46/3, 1/49/3, 1/48/3, 1/50/3), (3/20/3, 3/21/3, 3/19/3, 3/24/3, 3/23/3, 3/22/3, 3/18/3), (4/63/4, 4/59/4, 4/64/4, 4/65/4, 4/66/4), (5/47/4, 5/46/4), 4/67/4  
 Вариант 1 Машина 8: (2/29/3, 2/30/3, 2/28/3, 2/27/3), (4/61/4, 4/60/4, 4/62/4), (5/16/3, 5/15/3)  
 Вариант 1 Машина 9: 4/58/5, 5/14/4, (4/61/5, 4/62/5, 4/60/5), (5/16/4, 5/15/4), (4/63/5, 4/64/5, 4/65/5, 4/66/5, 4/67/5), (2/27/5, 2/30/5, 2/28/5, 2/29/5), 4/67/5, (5/47/5, 5/46/5)

Рис. 10.24 Результаты работы программы на листе 1

обрабатываются в две технологические партии: первая такая партия включает 4 передаточных партий, а вторая – одну передаточную партию; на машине 8 технологическая партия состоит из трех передаточных партий. Последняя (пятая) операция производится на машине 9 и состоит из четырех технологических. При этом сначала обрабатывается находившаяся ранее в изготовлении передаточная партия 58, затем три группы новых передаточных партий.

По окончании расчета на лист выводятся коэффициенты загрузки по каждой группе машин, а также номера вариантов, рекомендуемые в соответствии с методами Сэвиджа и Гурвица. Кроме того, для всех недоминируемых вариантов выводятся данные о значениях критериев  $U$ ,  $\bar{V}$  (рис. 10.25), а также значения основных показателей расписания: коэффициента неравномерности загрузки  $K_n$ , коэффициентов группирования  $K_g$  и запаздывания  $K_z$ , полной длительности выполнения расписания  $C_{max}$ , среднего  $T_c$  и наибольшего  $T_{max}$  запаздываний.

В приведенном примере группы машины, предназначенные для различных операций, загружены не одинаково. Наибольшая загрузка в 35% наблюдается в группе 5 (машина 9), наименьшая, равная 18% – в группе 1.

### 10.3.3 Анализ результатов планирования

На рис. 10.26 показано расписание для первого полученного варианта, составленное с учетом графика работы цеха. Начало и конец операции, как обычно, указывается в календарных часах, отсчитываемых от начала первого рабочего дня. В скобках записывается вид изготавливаемых деталей, номер операции и количество деталей в партии, внутри которой время ожидания поступления передаточных партий не превышает принятого норматива. В данном примере этот норматив установлен в 1 час.

На операции на машинах 1 и 2 первой группы запланированы на первый и второй дни, на большинстве машин составленное расписание укладывается в 4 рабочие дня установленного горизонта (пять календарных дней), и для некоторых машин расписание затрагивает пятый рабочий день.

В начале первого рабочего дня на машину 1 последовательно загружаются шесть передаточных партий деталей вида 3 для выполнения операции 1 (рис. 10.24). Т.к. перерывы между этими партиями отсутствуют, то все шесть передаточных партий объединяются в одну технологическую партию, в которой без перерывов обрабатываются 36 деталей (рис. 10.26). Аналогичная ситуация имеет место на машине 2 для деталей вида 1, для которых также выполняется операция 1.

Обработка деталей вида 2 на машине 1 должна проводиться для выполнения операции 2. Предыдущая операция запланирована на машине 5, где три передаточных партии по 6 штук каждая объединяются в одну технологическую, которая начинается в момент 18 часов и заканчивается в 35 часов. Эта партия в 2 приема переносится и продолжается на машине 1.

В другом примере, для деталей вида 4 операция 1 также проводится на машине 3, а операция 2 частично на машине 1, а частично – на машине 2. В этом случае время первой операции (0,15 часа, рис. 10.19) меньше у второй операции (0,25 часа), технологическая партия после первой операции передается на вторую операцию по частям (передаточным партиями). В результате операция 3 на машине 6 проводится в две технологические партии, одна из которых затем передается на машину 7, а другая на машину 8 для выполнения операции 4. Окончание обработки деталей вида 4 на операции 5 проводится на машине 9 в 4 технологические партии. Аналогичная ситуация имеет место на последующих операциях.

Система обеспечивает вывод расписания работы машин в виде диаграммы Ганта (рис. 10.27). Номер работы указывается на поле прямоугольника диаграммы, сверху записывается номер текущей операции.

Коэффициент плановой загрузки: 0,24

Группа 1: 0,18

Группа 2: 0,2

Группа 3: 0,3

Группа 4: 0,25

Группа 5: 0,35

Рекомендуемые варианты: по методу Сэнджа - вариант 1, по методу Гурица - вариант 1

Показатели вариантов расписания:

относительные затраты на наладку  $U$ , средняя полезность заказов  $V$ ;

коэффициент неравномерности загрузки  $K_n$ ; коэффициент группирования  $K_g$ ; коэффициент запаздывания  $K_z$ ;

полная длительность выполнения  $С_{\max}$ , среднее  $T_c$  и наибольшее  $T_{\max}$  запаздывания в календарных часах

Начальные значения критериев:  $U = 0$ ;  $V = 2,706856$

Вариант 1:  $U = 43,5$ ;  $V = -11,915$ ;  $K_n = 3,4$ ;  $K_g = 4,47$ ;  $K_z = 0,85$ ;  $С_{\max} = 161$ ;  $T_c = 55,2$ ;  $T_{\max} = 113,4$

**Рис. 10.25** Значения показателей расписания для различных вариантов

План загрузки оборудования в календарных часах по варианту 1

Машина 1: 9,5 (3/1/36) 16,7; 32,5 (2/2/6) 33,4; 36 (2/2/12) 37,8; 38,8 (4/2/18) 43,3; 44,8 (5/1/12) 47,2;

Машина 2: 10 (1/1/36) 17,2; 37,7 (4/2/36) 46,7; 47,7 (6/1/12) 82,1;

Машина 3: 12,7 (1/2/36) 23,5; 33 (4/1/54) 41,1; 82 (5/2/12) 83,8; 84,8 (6/2/12) 87,8;

Машина 5: 18 (2/1/18) 35; 36 (3/4/10) 37,5; 87,3 (3/4/41) 94,7;

Машина 6: 36 (1/4/34) 39,4; 41 (1/4/6) 41,6; 43,8 (4/3/18) 47,4; 80,9 (3/2/41) 91,2; 92,2 (1/4/6) 92,8;

104,8 (4/3/36) 111,9; 113,4 (2/4/28) 117,6; 119,1 (6/3/12) 129,5;

Машина 7: 17 (1/3/36) 43; 85,4 (3/3/41) 92,9; 110,2 (4/4/30) 119,2; 130,3 (6/4/12) 133,9; 135,9 (4/4/6) 137,8;

Машина 8: 35,9 (2/3/28) 42,3; 82 (4/4/18) 87,4; 88,4 (5/3/12) 90,2;

Машина 9: 12 (4/5/10) 15; 16,5 (5/4/10) 21; 85,8 (4/5/18) 92; 93,5 (5/4/12) 106,9; 114 (4/5/30) 131,8;

132,8 (2/5/28) 142,6; 143,6 (4/5/6) 153,4; 154,9 (6/5/12) 160,9;

**Рис. 10.26** План загрузки машин

Рассмотрим, например, движение партий деталей вида 4 на диаграмме. Как указывалось выше, первая операция для деталей вида 4 проводится на машине 3. Не дожидаясь окончания всей партии на машине 3, ее части переносится на машины 1 и 2 для проведения второй операции. В конце первого рабочего дня одна передаточная партия переносится с машины 1 на машину 6 для выполнения третьей операции. В течение второго рабочего дня (рабочее время больше 16 часов) партия деталей вида 4 постепенно переносится на машину 6. Четвертая операция для этих деталей проводится на машинах 7 и 8. На машине 9 для операции 5 планируется 4 технологических партий.

Программа позволяет отследить движение запасов по всем видам деталей (рис. 10.28). Здесь в скобках указывается объем запаса перед моментом поступления новой партии готовых деталей, затем (через дробь) объем запаса после поступления, и, при возникновении дефицита – объем дефицита. Программа предусматривает пополнение запасов после окончания последней операции для каждой передаточной партии.

Поступление деталей определяется достаточно точно по окончании выполнения каждой передаточной партии на последней операции. В тоже время плановый расход деталей здесь устанавливается по предполагаемому расходу комплектов, что, конечно, часто выполняется не в полном объеме. Поэтому данные на рис. 10.28 могут рассматриваться только как ориентировочные.

В данном случае движение запасов проходит в течение четырех рабочих дней, соответствующих горизонту расчета. В момент 0 записываются запасы для деталей каждого вида, а также (через дробь) возможные задолженности. Например, для детали 1 первое поступление имеет место в 36,6 часа и после поступления запас равен 9 деталям. Детали вида 2, 4 значительную

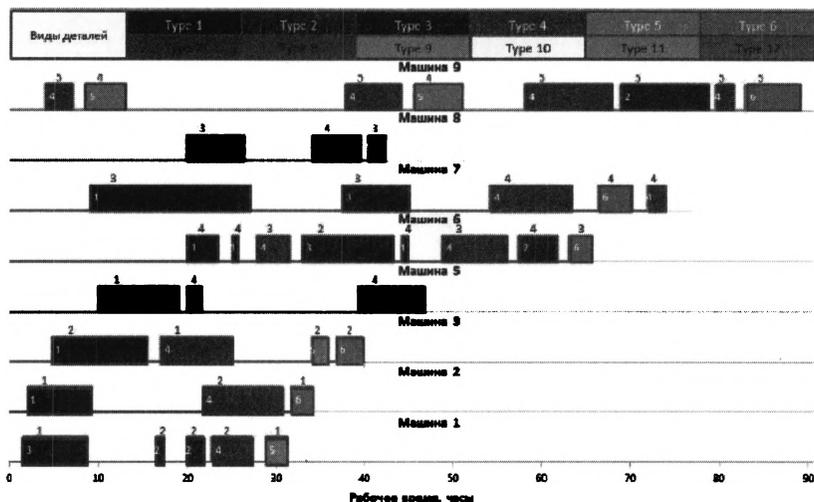


Рис. 10.27 Диаграмма Ганта

Движение запасов в часах рабочих дней согласно выбранному варианту в пределах границ расписания

Деталь 1:	0 (20)	36,6 (3/9)	37,2 (9/15)	38,2 (14/20)	38,8 (20/26)	39,4 (26/32)	41,6 (31/37)	68,8 (25/31)	96 (15/15)	
Деталь 2:	0 (15/2)	96 (0/0/23)								
Деталь 3:	0 (20)	37,5 (0/6/1)	64,2 (0/6/8)	65,1 (0/6/3)	66 (2/8)	66,9 (7/13)	68,2 (12/18)	69,7 (17/23)	70,7 (22/28)	96 (10/10)
Деталь 4:	0 (15)	15 (4/10)	63,6 (0/6/14)	66,2 (0/6/10)	68 (0/6/5)	91,8 (0/6/11)	94,4 (0/6/7)	96 (0/0/2)		
Деталь 5:	0 (6/2)	21 (0/6/1)	80,2 (0/6/4)	82,9 (1/7)	96 (4/4)					
Деталь 6:	0 (10)	96 (0/0/2)								

Рис. 10.28 Движение запасов в календарных часах рабочих дней

часть времени находятся в дефиците. Деталь 3 имеется в требуемом наличии в течение всего рассматриваемого периода. Движение запасов можно проиллюстрировать диаграммой (рис. 10.29).

Из графиков на рис. 10.29 видно, что в данном примере дефицит деталей для выпуска запланированных комплектов случается относительно редко. В то же время программа спланировала выпуск детали достаточно большими партиями, что обеспечивает небольшие затраты на переналадки.

Графики строятся для времени рабочих дней, что соответствует заданию в суткокомплектах – расчетному расходу в один рабочий день. На самом деле отгрузка деталей производится комплектами, поэтому фактическое состояние запасов может определять в момент отгрузки – например, после каждого рабочего дня.

Программа рассчитывает номера очередных партий для деталей всех видов при их поступлении на склад (рис. 10.30). Здесь в скобках записывается номер партии и (через дробь) количество деталей, и после скобок – время поступления в календарных часах.

Например, номер последней сданной партии для деталей вида 1 равен 43 (рис. 10.21). В данном случае готовые детали поступают с машины 6 на склад в три партии – одну в 34 и две по 6 штук. Детали вида 2 выпускаются на машине 9 без перерывов и поступают в виде

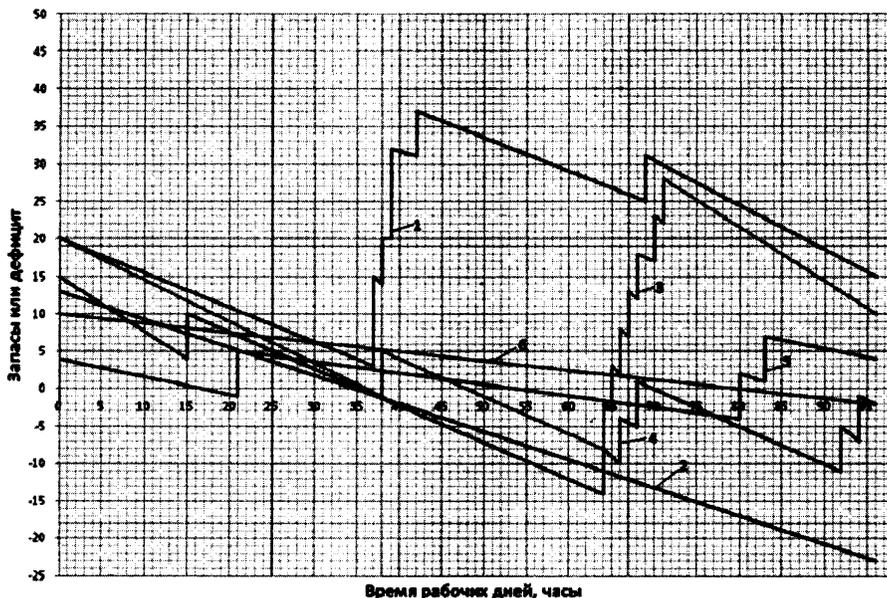


Рис. 10.29 График движения запасов деталей

Партии выпуска по варианту 1							
Деталь 1	Машинка 6: (44/34)	39,4	(45/6)	41,6	(46/6)	92,8	
Деталь 2	Машинка 9: (27/28)	142,6					
Деталь 3	Машинка 5: (17/10)	37,5	(18/41)	94,7			
Деталь 4	Машинка 9: (58/10)	15	(59/18)	92	(60/30)	131,8	(61/6) 153,4
Деталь 5	Машинка 9: (14/10)	21	(15/12)	106,9			
Деталь 6	Машинка 9: (46/12)	160,9					

Рис. 10.30 Партии поступления деталей на склад готовой продукции

одной партии. Последние операции для деталей вида 3 производятся на машине 3 и поступают на склад двумя партиями и т.д.

Поставка комплектов в течение планируемого горизонта производится в соответствии с планом на рис. 10.31. В данном случае рассматривается производство в переходной период, когда выпуск комплектов еще не стабилизировался. Впоследствии поставка комплектов становится более регулярной.

В каждой строке плана указывается номер комплекта и (через дробь) их количество. В данном случае наибольший коэффициент приоритета имеют комплекты типа 2 (рис. 10.23). Поскольку этого типа потребность составляет 1,5 суткокомплекта, то в разные рабочие дни поставляются либо 1, либо 2 комплекта. Комплекты других типов в рассматриваемом периоде поставляются по мере накопления необходимых деталей.

Комплекты выпуска по варианту 1				
Рабочий день 1	2/1	1/5	3/3	
Рабочий день 2	2/1	1/2	3/1	
Рабочий день 3	2/2	1/0	3/0	
Рабочий день 4	2/2	1/5	3/3	

Рис. 10.31 План поставки комплектов на горизонте

### 10.3.4 Листинг основной части программы

На каждом уровне построения дерева расписания используются пять обычных массивов  $UStage()$ ,  $VStage()$ ,  $ParStage()$ ,  $CompStage()$ ,  $Tk()$ , а также основные массивы  $NPStage()$ ,  $NPBStage()$ ,  $NPDtage()$ ,  $NPRStage()$ ,  $MachStage()$ , в которых записываются значения видов деталей, номеров партий, номеров операций, меток законченности обработки и номеров машин соответственно.

Поскольку для каждой операции могут применяться несколько параллельных машин, приходится использовать дополнительный массив  $FStage()$ . Соответственно для дальнейшего построения ветвей дерева путем перезаписи значений параметров недоминируемых узлов используются массивы  $U()$ ,  $V()$ ,  $Par()$ ,  $Comp()$ ,  $NP()$ ,  $NPB()$ ,  $NPD()$ ,  $NPR()$ ,  $Mach()$ ,  $Commen()$ ,  $FComp()$ .

Программа автоматически переносит данные с листа в переменные и массивы. Вначале прочитываются таблица рабочего календаря и таблица переналадок, после чего определяется двумерный массив количества деталей разного вида (рис. 10.32).

При наполнении массивов детalloпераций (рис. 10.33) определяется полная трудоемкость  $pD$  детали путем суммирования трудоемкости всех ее операций, количество операций по каждой детали  $ND$  и номер строки первой операции для детали  $FD$ .

Для каждой машины запоминается ее первоначальная настройка на определенный тип деталей и ожидаемое время освобождения; для каждого типа комплекта устанавливаются ежедневный расход, коэффициент приоритета и последний сданный номер партии. Затем по каждому виду деталей рассчитывается потребность в деталях этого вида на горизонте планирования (рис. 10.34).

Для каждой передаточной партии, которая находится в производстве, запоминаются ее параметры и ожидаемые моменты готовности к следующим операциям. Объем технической партии для каждого вида деталей определяется по значению средней потребности деталей

```

NKom = Cells(2, "J").Value 'Количество видов комплектов
Nvid = Cells(2, "H").Value 'Количество видов деталей'
...
For i = 1 To Beta
    kom(i) = Cells(Alfa, Gamma).Value 'номер комплекта
    des(i) = Cells(Alfa, Gamma + 1).Value 'номер детали
    kol(i) = Cells(Alfa, Gamma + 2).Value 'количество деталей в одном комплекте
    Alfa = Alfa + 1
Next i
ReDim Part(NKom, Nvid)
For j = 1 To Beta
    Part(kom(j), des(j)) = kol(j) 'количество деталей в одном комплекте'
Next j
    
```

Рис. 10.32 Определение массива количества разных деталей в комплектах

```

For i = 1 To BetaD
    desD(i) = Cells(Alfa, Gamma).Value 'наполнение массивов деталейопераций '
    numD(i) = Cells(Alfa, Gamma + 1).Value 'обозначение детали '
    machD(i) = Cells(Alfa, Gamma + 2).Value 'номер деталиоперации'
    p(i) = Cells(Alfa, Gamma + 3).Value 'группа машин для текущей деталиоперации'
    maxND = 0 'трудоемкость деталиоперации'
    If numD(i) = 1 Then
        pD(desD(i)) = p(i) 'трудоемкость детали на первой операции'
        ND(desD(i)) = 1
        FD(desD(i)) = i 'номер строки с первой операцией'
    Else
        pD(desD(i)) = pD(desD(i)) + p(i) 'определение полной трудоемкости детали'
        ND(desD(i)) = ND(desD(i)) + 1 'определение полного числа операций для детали'
    End If
    Alfa = Alfa + 1 'переход к следующей деталиоперации'
    If ND(desD(i)) > maxND Then 'нахождение наибольшего числа операций над деталью одного типа'
        maxND = ND(desD(i))
    End If
Next i
    
```

Рис. 10.33 Определение параметров для каждой детали

```

For i = 1 To Nvid 'по видам деталей
    Vid(i) = Cells(Alfa, Gamma + i - 1).Value
    If Cells(1, "AM").Value = 0 Then 'флаг передаточной партии в нуле
        MinP(i) = Cells(Alfa + 1, Gamma + i - 1).Value
        'минимальный размер передаточной партии для деталей текущего вида
    Else
        MinP(i) = Cells(2, "R").Value 'минимальный размер передаточной партии для всех видов деталей
    End If
    Stock0(i) = Cells(Alfa + 2, Gamma + i - 1).Value 'массив начальных запасов'
    Back(i) = Cells(Alfa + 3, Gamma + i - 1).Value 'массив задолженностей по поставкам'
    Save(i) = Cells(Alfa + 4, Gamma + i - 1).Value 'массив страховых запасов'
    r(i) = Cells(Alfa + 5, Gamma + i - 1).Value * E(1) ' момент поступления сырья в календарных часах
    LastP(i) = Cells(Alfa + 6, Gamma + i - 1).Value 'массив номеров последних сланных партий
    MaxnumP(i) = LastP(i) 'последний номер устанавливается по сланной партии
    MaxnumPZ(i) = MaxnumP(i) 'временный номер последней партии
    Cons(i) = 0
    For j = 1 To NKom 'по типам комплектов
        Cons(i) = Cons(i) + Part(j, i) * Kom(j) ' необходимое количество деталей в рабочий день
    Next j
    Work(i) = Cons(i) * NGor - Stock0(i) + Back(i) + Save(i) 'потребность на горизонте планирования'
    If Work(i) < 0 Then
        Work(i) = 0
    End If
Next i
    
```

Рис. 10.34 Расчет потребности деталей на горизонте планирования

этого вида в одном комплекте. Если эта величина меньше значения нормативной передаточной партии, то значение технической (минимально возможной) партии  $p_{av}$  устанавливается равным значению передаточной партии.

При подготовке к организации узлов первого уровня устанавливаются номера операций и моменты их окончания для каждой возможной операции (рис. 10.35). На рис. 10.36 определяется необходимое количество партий  $Batch$  деталей каждого вида на горизонте планирования, а также требуемые момент готовности этих партий  $d$ . Для каждой партии рассчитывается ее трудоемкость

Затем устанавливается наибольшее возможное количество партии деталей одного вида  $maxBatch$  (рис. 10.37). Сначала это количество определяется по сумме требуемых новых партий  $Batch$  и количества партий, уже находящихся в производстве (наибольший номер партии в

```

Nvid = Cells(2, "H").Value 'Количество видов деталей'
...
Beta = Range(UpperLeft1, LowerRight1).Rows.Count - 2
'количество строк (партий в работе)'
...
NBranch(1) = Beta + Nvid
'наибольшее возможное количество работ на первом этапе (один исходный узел)
...
For i = 1 To NBranch(1) 'наполнение временных массивов для первоначальных партий'
If i <= Beta Then 'для партий в работе
    numPZ(i) = numP(i) 'массив номеров изготавливаемых партий
    numPDZ(i) = numPD(i) + 1 'массив номеров выполняемых деталяеопераций
    desPZ(i) = desP(i) 'массив номеров деталей в списке первоначальных партий
    exD0Z(i) = exD0(i) 'массив ожидаемых моментов выполнения текущих партий
    kolPZ(i) = kolP(i) 'массив количества в изготавливаемой партии
Else 'для возможных новых партий
    m = i - Beta
    numPZ(i) = MaxnumPZ(m) + 1 'массив номеров последних партий в производстве+1
    numPDZ(i) = 1 'номера выполняемых деталяеопераций
    desPZ(i) = m 'номера типов деталей
    exD0Z(i) = 0 'момент выполнения партий неопределен
    kolPZ(i) = rav(m) 'количество в изготавливаемой партии равно технической партии
End If
Next i
    
```

Рис. 10.35 Параметры операций узлов первого уровня

производстве *Maxnum*, последний номер партии, сданной на склад *LastP*). Однако на горизонте количество таких партий, одновременно находящихся в производстве может быть заметно больше из-за неравномерности процессов производства. В общем случае это количество не превышает двойной величины от расчетной.

На рис. 10.38 показано определение двумерных массивов календарного времени окончания каждой необходимой партии *dZ*. Для этого используется функция *Calend()*, использующая два параметра: начальный момент и длительность в рабочих часах. В данном случае начальным моментом является требуемый момент изготовления первой партии *d*, а длительность изготовления определяется по *j*-ой партии деталей вида *i* с величиной *kolPZ* и расходом в рабочий день *Cons*.

Для всех незаконченных партий (рис. 10.39) определяется момент готовности следующей деталяеоперации *RD*. Затем для каждой партии *q* рассчитывается необходимый момент окончания деталяеоперации *dDet* и момент ее начала *gs*.

Расчет основных параметров узлов первого уровня по всему количеству заказов производится в двойном цикле: внешний цикл осуществляется по возможным деталяеоперациям, а внутренний цикл – по включенным машинам (рис. 10.40). Для каждой партии, планируемых для изготовления, устанавливается текущий последовательный номер *q*. Возможный момент начала операции *Tk* в узле *n* сначала определяется по максимуму моментов готовности партии к операции *RD* и освобождения машины *K0*. Если машину необходимо перенастроить, то учитывается длительность переналадки *s*. С помощью функции *Calend()* определяются моменты начала *Tk* и окончания *CompStage* операции.

Полезность заказов *V* в узле рассчитывается с помощью функции, показанной на рис. 10.41. Для всех партий, находящихся в производстве, сначала определяется составляющая от первой необходимой в узле операции, которая затем суммируется с составляющими от других, еще не выполняемых операций.

```

intWork = 0
For i = 1 To NBranch(1) ' по строкам партий, которые могут участвовать в обработке
aJ(1) = 1 'начальная установка работ на невыполнение
If i <= Beta Then 'по строкам запасов
m = desP(i) 'номер детали
j = FD(m) 'номер первой операции для текущей детали в списке деталяеопераций
Do While numD(j) <= numPD(i)
'по строкам деталяеопераций: находимеи очередной в обработке строки деталяеопераций
j = j + 1
Loop
intWork = intWork + ND(m) - numPD(i)
'количество оставшихся работ (детальяеопераций) в начальных партиях'
If dead(j) = m Then 'если найденная строка относится к этой же детали
LastN(i) = j
'номера строк новых операций таблицаи деталяеопераций для партий, которые уже в производстве
Else 'если номер операции в строке запасов последний
LastN(i) = 0
End If
Else
m = i - Beta 'текущей номер детали
LastN(i) = FD(m) 'номер строки таблицаи деталяеопераций для первой операции
If Int((Work(m) - kolG(m)) / rav(m)) = (Work(m) - kolG(m)) / rav(m) Then
' если расчетное количество партий целое
Batch(m) = (Work(m) - kolG(m)) / rav(m)
Else 'если расчетное количество не целое'
Batch(m) = Int((Work(m) - kolG(m))) / rav(m) + 1
End If
If Batch(m) < 0 Or Work(m) <= 0 Then 'если необходимость в новых партиях отсутствует '
Batch(m) = 0
End If
intWork = intWork + ND(m) * Batch(m)
'полное количество работ (количество партий*количество операций) на горизонте'
d(m) = (Stock0(m) - Back(m) - Save(m)) / Cons(m) * 24
'необходимый момент изготовления первой партии в рабочих часах '
For k = FD(m) To FD(m) + ND(m) - 1
Wip(machD(k)) = Wip(machD(k)) + p(k) * rav(m) * Batch(m)
'накапливаемая трудоемкость в группе машин'
Next k
End If
rav(m) = rav(m) * pD(m) ' трудоемкость партии
Next i
    
```

Рис. 10.36 Расчет необходимого количества партий каждого вида

В узле также записываются значения номера вида детали, номера партии, номера операции, номера родительского узла и признак необходимости дальнейшей обработки текущей партии. Затем производится отсечение узлов по критериям и перенос в полные массивы недоминируемых узлов дерева решений.

На последующих уровнях *intY* построения дерева решений все этапы программы первого уровня повторяются с некоторыми изменениями. В каждом узле ветвления *intZ* запоминается расчетная полезность в созданном узле *sngVz*, номер машины в узле *intMz*, фиктивной расчетной длительности в узле *sngCz*, а также номер вида деталей в узле *intNP*, номер партии *intNPB* и номер операции *intNPD*. Затем восстанавливается вся цепочка дерева в узле (рис. 10.42), причем отдельно учитываются участвующие в цепочке начальные передаточные партии.

После определения количества *m* всех партий в производстве для текущего узла переназначаются массивы параметров операций, исходящих из текущего узла. Эти параметры переопределяются аналогично рис. 10.35. Кроме того, устанавливаются необходимые моменты готовности каждой партии в двумерном массиве *dZ* аналогично рис. 10.38.

Для каждой уже проведенной операции запоминаются номера *LastN* соответствующих строк таблицы деталяеопераций (рис. 10.43).

```

maxBatch = 0
For i = 1 To NVid
    If maxBatch < Batch(i) + MaxnumP(i) - LastP(i) Then
        maxBatch = 2 * (Batch(i) + MaxnumP(i) - LastP(i))
        'количество новых партий плюс количество партий в работе в начале планирования
        'максимальное количество партий одного вида может достигнуть до двух горизонтов
    End If
Next i
    
```

Рис. 10.37 Определение максимально возможного количества партий одного вида

```

ReDim dZ(NVid, maxBatch) ' массив требуемых дат для каждой партии'
For i = 1 To NVid 'для всех типов деталей
    q = MaxnumPZ(i) - LastP(i) + 1 'номер новой партии
    For j = 1 To maxBatch 'для всех необходимых партий
        If j <= q Then 'для возможных партий, включая новую
            dZ(i, j) = Calend(d(i), (j - 1) * kolPZ(i) / Cons(i) * 24, 1, 1)
            'требуемый момент полного выполнения партии в календарных часах
        Else
            j = maxBatch 'конец цикла
        End If
    Next j
Next i
    
```

Рис. 10.38 Требуемые моменты выполнения партий в календарных часах

```

For i = 1 To NBranch(1) 'по возможному количеству работ
    If LastN(i) > 0 Then 'для незаконченных партий'
        m = desPZ(i) 'номер детали
        If exDOZ(i) = 0 Then 'последняя операция к началу планирования уже выполнена'
            RD(i) = 0
        Else
            RD(i) = exDOZ(i) + Tm ' момент готовности следующей деталиперации
        End If
        q = numPZ(i) - LastP(m) ' добавка номера партии, находящейся в производстве
        dDet(i) = dZ(m, q) 'начальное значение необходимого момента выполнения очередной партии
        ravz(i) = 0
        If numD(LastN(i)) < ND(m) Then
            'если номер последней операции меньше максимального для текущего типа
            For j = 1 To ND(m) - numD(LastN(i)) 'по всем необходимым для партии операциям '
                dDet(i) = dDet(i) - p(LastN(i) + j) * kolPZ(i) - Tm
                ' необходимый момент выполнения деталиперации
                ravz(i) = ravz(i) + p(LastN(i) + j) * kolPZ(i)
                ' оставшаяся трудоемкость текущей партии после операции
            Next j
        End If
        gs(i) = dDet(i) - p(LastN(i)) * kolPZ(i) 'необходимый момент начала новой операции '
    End If
Next i
    
```

Рис. 10.39 Определение необходимых моментов окончания и начала деталипераций

```

n = 0 'начало - нулевой узел первого уровня'
For i = 1 To NBranch(1) 'по возможному количеству работ
If LastN(i) > 0 Then 'для незаконченных партий'
m = desPZ(i) 'номер детали
aJ(i) = 0.5 'выполняемая работа
q = numPZ(i) - LastP(m) 'добавка номера партии, находящейся в производстве
Exec = p(LastN(i)) * kolPZ(i) 'трудоемкость первой необходимой операции в партии
For j = 1 To NMach 'по всем машинам
If MachN(j) = 1 And machD(LastN(i)) = MachG(j) Then 'для включенных машин необходимой группы
n = n + 1 'номер текущего узла первого уровня'
If Vid0(j) = m Then 'совпадение настройки'
UStage(n) = 0
Else
UStage(n) = Uzak(m, j) 'затраты на наладку'
End If
Tk(n) = Application.Max(RD(i), K0(j)) 'возможный момент начала операции
If m <> Vid0(j) Then 'если вид новой детали отличается от начальной настройки машины
Tk(n) = Calend(Tk(n), z(m, MachG(j)), j, 1) 'учитывается длительность переналадки
End If
'начало деталиеоперации равно моменту освобождения машины плюс время наладки'
CompStage(n) = Calend(Tk(n), Exec, j, 2) 'момент окончания работы в календарных часах
If CompStage(n) = 0 Then 'если не определен момент окончания работы
MsgBox * недостаточен рабочий горизонт "
Exit Sub
End If
ParStage(n) = 0 'в узле родительский уровень 0 '
NPStage(n) = m 'номер детали в узле '
NPPStage(n) = numPZ(i) 'номер партии в узле '
NPDStage(n) = numPZ(i) 'номер операции в узле '
VStage(n) = (V0 * Cl(j) + Vzak(NBranch(1), Exec, i, q, Cl(j), Tk(n), CompStage(n))) / CompStage(n)
'полезность всех деталиеопераций в узле'
If NPDStage(n) = ND(m) Then 'если операция для партии последняя
NPRStage(n) = 0 'признак окончания обработки партии'
Else
NPRStage(n) = 1 'признак продолжения обработки партии'
End If
MachStage(n) = j 'машина в узле'
GStage(n) = gs(i) 'необходимый момент начала операции в узле'
End If
Next j
aJ(i) = 1 'возврат признака выполненной работы
End If
Next i
    
```

Рис. 10.40 Определение параметров узлов первого уровня

Затем определяются моменты готовности партии к дальнейшей обработке  $RD$ , необходимые моменты  $dDet$  окончания и начала деталиеопераций  $gs$  аналогично рис. 10.39. Определение параметров узлов на текущем уровне осуществляется аналогично рис. 10.40 первого уровня. После этого производится отсечение узлов по критериям и перенос в полные массивы недоиминуемых узлов дерева решений.

Для полученного набора вариантов проводится поиск наиболее целесообразного варианта методами Свиджа и Гурвица. Полученные результаты поиска наилучшего решения печатаются на листе MS Excel. Непосредственно после этих результатов записываются значения средних затрат на наладку и средней полезности заказов по каждому варианту, а также значения коэффициента группирования, коэффициента запаздывания, полной длительности выполнения, среднего и наибольшего запаздываний.

Для выбранного варианта осуществляется запись его расписания в календарных часах. Движение запасов рассчитывается в часах рабочих дней, т.к. полагается, что отгрузка ком-

```

Function VZak(inBeta, inP, ink, inq, snCl, snTk, snFk)
VZak = 0
For i = 1 To inBeta 'по партиям, уже находящимся в производстве
If LastN(i) > 0 Then
m = desPZ(i) 'номер детали'
snQ = pavz(i) + p>LastN(i) * kolPZ(i) 'полная оставшаяся трудоемкость партии
If aJ(i) = 0.5 Then 'для выполняемой деталиеопераций'
VZak = VZak + Vvbor(aJ(i), 1, inP, inP, dDet(i), snCl, snTk, snFk)
' для первой необходимой операции 'для последующих операций
Else
VZak = VZak + Vvbor(aJ(i), 1, snQ, inP, dZ(m, inq), snCl, snTk, snFk)
'для невыполняемых операций
End If
End If
Next i
End Function
    
```

Рис. 10.41 Расчет полезности заказов в узле

```

m = 0
Do Until k = 0
If NPR(k) = 1 Then 'если метка в цепочке рабочая'
m = m + 1 'партия в цепочке узла учитывается как возможная к продолжению'
Else 'для узла с меткой окончания операций'
MaxnumPD(NP(k), NPB(k) - LastP(NP(k))) = ND(NP(k))
'записи последнего номера операции в массив последних выполненных операций'
End If
If NPB(k) <= MaxnumP(NP(k)) Then
'для узлов с номерами партий, меньшими или равными последним выполненным '
For i = 1 To Beta 'по строкам начальных партий '
If desP(i) = NP(k) And numP(i) = NPB(k) Then
'операция в цепочке проводится над одной из начальных партий'
PRN(i) = 1 'начальная партия включена в цепочку узла'
i = Beta
End If
Next i
End If
k = Par(k) 'движение вверх по цепочке'
Loop
    
```

Рис. 10.42 Восстановление цепочки дерева в узле

плектов производится только в эти дни. Параллельно создается массивы исходных данных для построения диаграммы Ганта и диаграммы запасов.

На лист также выводятся партии готовой продукции, сдаваемые на склад. Формирование этих партий происходит в каждом случае, когда при изготовлении передаточных партий происходит перерыв во времени обработки больше установленного норматива (в данном случае равного одному часу). График поставки комплектов по рабочим дням строится с учетом приоритета, при котором имеющийся запас деталей расходуется последовательно на комплекты с большим приоритетом.

```

For i = 1 To Beta1 'по строкам партий, которые могут участвовать в обработке
aJ(i) = 1 'начальная установка работ на невыполнение
m = desPZ(i) 'номер детали
j = FD(m) 'номер первой операции в списке деталиеопераций
Do While numD(j) < numPDZ(i)
'по строкам деталиеопераций: нахождение очередной в обработке строки деталиеопераций
j = j + 1
Loop
If desD(j) = m Then 'если найденная строка относится к этой же детали
LastM(i) = j
'номера строк новых операций таблицы деталиеопераций для партий, которые уже участвуют в работе
Else 'если номер операции в строке запасов последний
LastM(i) = 0
End If
Next i
    
```

Рис. 10.43 Определение номеров строк проведенных операций

### 10.3.5 Перепланирование расписания

Рассмотрим пример перепланирования задания, первоначально имеющего вид, приведенный на листе 1 в книге MBook11.xls. В данном примере, в течение первого и второго рабочего дня планируются две 8-часовые рабочие смены. Следующий календарный день выходной, после которого опять планируется двухсменная работа.

Поскольку продолжительность первого рабочего дня в данном случае составляет 16 часов, при работе в точном соответствии с расписанием, в течение дня (до момента 24 часа) на первой машине, например, должны быть обработаны 36 деталей вида 3 на операции 1 (рис. 10.26), а на машине 2 должна быть выполнена операция 1 для шести передаточных партий деталей вида 1. Аналогичная ситуация имеет место и на других машинах.

Положим, что к моменту окончания первого рабочего дня расход суткокомплектов типа 2 изменился с 1,5 до 2, а суткокомплектов типа 3 с 3 до 2,5. В такой ситуации требуется перепланирование расписания, начиная со следующего рабочего дня. Кроме того, пусть приоритет комплектов типа 3 изменится с 1 до 1,5.

Для корректировки расписания скопируем лист 1 на лист 2, очистим этот лист от результатов предыдущего расчета. Для каждой машины, используя рис. 10.26, введем настройку на вид детали на момент 24 часа и ожидаемый момент освобождения в рабочих часах следующего дня. Для деталей каждого вида необходимо записать величину запаса на момент начала следующего рабочего дня (32 часа). Поскольку фактическая отгрузка комплектов часто не совпадает с реальной, расчет запаса после каждого рабочего дня может производиться с помощью таблицы на рис. 10.44.

Детали	Остаток	Расход на комплекты						Расход	Выпуск	Запас
		1	2	3	1	2	3			
1	20	2	10	3	3	0	0	13	0	7
2	13	0	0	0	0	3	9	9	0	4
3	20	1	5	0	0	4	12	17	0	3
4	15	3	15	0	0	1	3	19	10	6
5	4	0	0	4	4	0	0	4	10	10
6	10	0	0	2	2	0	0	2	0	8

Рис. 10.44 Расчет запасов на момент начала нового рабочего дня

В данном случае цех выпускает три типа комплектов, в состоящих из деталей шести видов. В левой части таблицы на рис. 10.44 записываются остатки деталей на начало первого планового дня. Затем для каждого комплекта записываются нормы количества каждой детали в одном комплекте, и количество деталей, соответствующее количеству комплектов, отгружаемых в первый день (рис. 10.31). Сумма деталей по всем отгружаемым комплектам составляет расход за прошедший день. После учета выпущенных за этот день партий деталей (рис. 10.30) рассчитывается остающийся запас.

Кроме того, необходимо отредактировать номера последних сданных на склад партий. В данном примере, в течение первого рабочего дня на склад должна быть сдана одна партия деталей вида 4 и одна партия деталей вида 5, которые по плану должны быть выпущены в 15 и 21 часов соответственно (рис. 10.30).

Затем составляется таблица передаточных партий, находящихся в производстве (рис. 10.45).

Аналогично рис. 10.22 начатые передаточные партии сортируются по видам деталей и номерам операций. В данном случае, например, в производстве одновременно находятся 7 передаточных партий деталей вида 1, из которых 6 партий к началу следующего дня должны оставаться на машине 3, а одна партия на межоперационном складе. Номера передаточных партий проставляются в порядке, обратном номерам операций, причем первый номер должен быть на единицу больше номера последней партии, сданной на склад.

Для трех передаточных партий деталей вида 2 в первый день обработке выполнялась операция 1, а уже ранее находившаяся в обработке партия с номером 27 (рис. 10.22) должна быть передана на межоперационный склад. Для деталей вида 3 выполняется операция 1 для 6 пе-

Передаточные партии 16.09.16 8:00					
	Номер детали	Номер последней выполняемой операции	Номер партии	Количе ство в партии	Номер машины
	1	2	50	6	3
	1	2	49	6	3
	1	2	48	6	3
	1	2	47	6	3
	1	2	46	6	3
	1	2	45	6	3
	1	3	44	10	0
	2	1	30	6	5
	2	1	29	6	5
	2	1	28	6	5
	2	2	27	10	0
	3	1	24	6	0
	3	1	23	6	0
	3	1	22	6	0
	3	1	21	6	0
	3	1	20	6	0
	3	1	19	6	0
	3	1	18	5	0
	3	3	17	10	0

**Рис. 10.45** Назначение номеров передаточных партий, находящихся в производстве

редаточных партий на машине 1. Обработка деталей видов 4, 5 и 6 в течение первого дня не запланирована.

После подготовки таблицы на рис. 10.45 может быть проведено перепланирование (рис. 10.46). На рис. 10.47 приведен план выпуска комплектов на установленном горизонте.

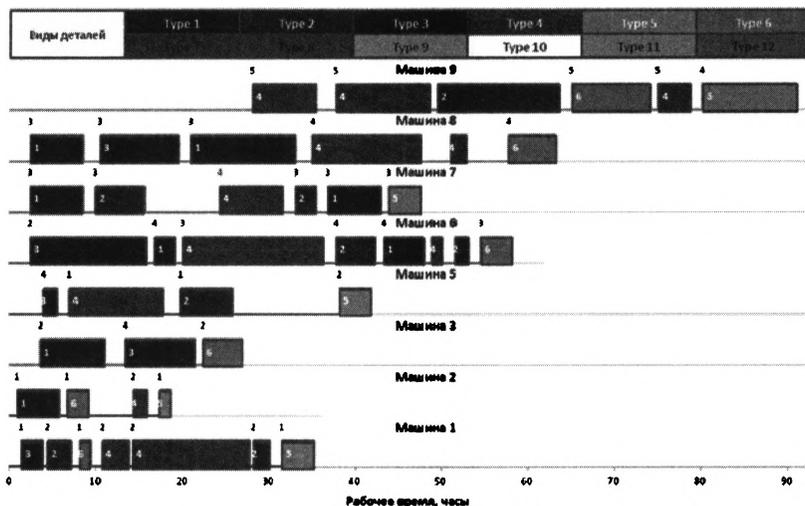


Рис. 10.46 Диаграмма Ганта после перепланирования

Комплекты выпуска по варианту 1			
Рабочий день 1	2/2	3/1	1/2
Рабочий день 2	2/0	3/2	1/0
Рабочий день 3	2/2	3/0	1/0
Рабочий день 4	2/0	3/0	1/5

Рис. 10.47 План выпуска комплектов после перепланирования

Очевидно, что значительные изменения в плане выпуска комплектов повлекли существенные изменения в загрузке оборудования. Т.к. обрабатываемые детали подвергаются целому ряду последовательных операций, переход на новый план выпуска происходит с определенным отставанием, особенно по комплектам с меньшим приоритетом.

### 10.3.6 Моделирование расписания

Форма моделирования здесь несколько усложняется (рис. 10.48). Кроме обычных параметров моделирования и горизонта планирования, предусматривается также возможность варьирования количеством деталей в передаточной партии. Для этого используется кнопка, при нажатии которой для деталей любого вида устанавливается заданная величина партии.

На листе 3 представлены варианты расчетов расписаний при различных значениях ограничителей ветвления. При увеличении значений ограничений  $B1$ ,  $B2$  и уменьшении  $B3$  пучок возможных ветвей дерева расширяется, что приводит к большому значению количества узлов

Рис. 10.48 Форма моделирования

на каждом уровне построения дерева. При  $B1 = 100$ ,  $B2 = 10$  и  $B3 = 0,001$  количество вариантов равно 2, а длительность решения составляет 38 сек., при  $B1 = 64$ ,  $B2 = 5$  и  $B3 = 0,005$  длительность решения уменьшается до 13 сек. В первом случае относительные затраты на наладку  $U$  имеют значение около 2 ед./день, в остальных случаях эти затраты достигают значения 4. Наоборот, величина коэффициента запаздывания  $K_z$  в первом случае составляет 0,75, а в других – порядка 0,58.

На листе 4 определяется рациональный горизонт планирования. На рис. 10.49 приведены графики изменения показателей расписания в зависимости от планового горизонта.

Очевидно, что приведенные на рис. 10.49 параметры растут с величиной планового горизонта. Здесь установить критическое значение горизонта затруднительно; можно в данном случае полагать, что рациональное значение горизонта находится в пределах от 4 до 6 рабочих дней.

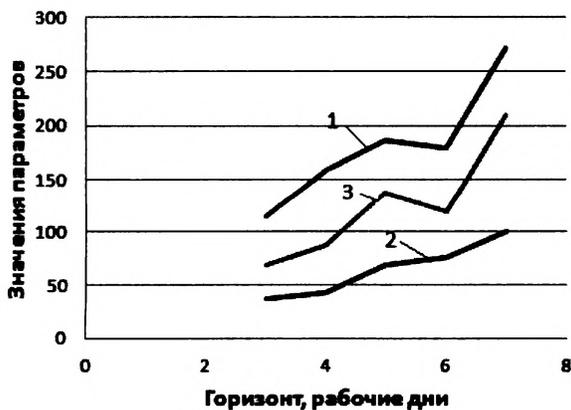


Рис. 10.49 Параметры расписаний для разных горизонтов: 1 – полная длительность выполнения  $Stat$ ; 2 – среднее  $T_c$  запаздывание в календарных часах; 3 – наибольшее  $T_{max}$  запаздывание в календарных часах.

На рис. 10.50 показаны результаты моделирования расписаний с различными количествами деталей в передаточной партии, рассчитанные на листе 5.

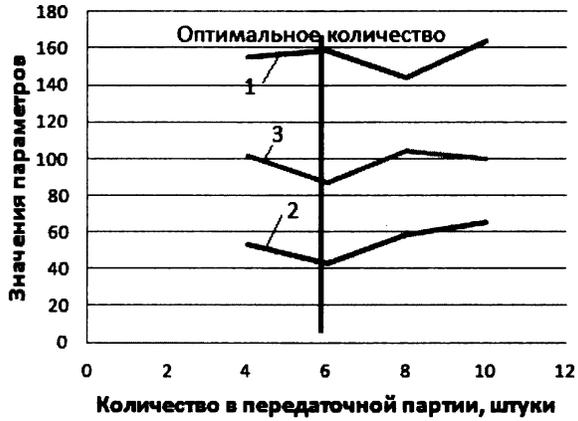


Рис. 10.50 Определение оптимальной передаточной партии

## Расписания для производственных бригад

11.1 Введение .....	275	11.4 Анализ результатов планирования .....	281
11.2 Исходные данные задачи .....	278	11.5 Листинг основной части программы .....	283
11.3 Работа с программой .....	280	11.6 Коррекция расписания .....	290

### 11.1 Введение

В современных методах планирования производства каждый организационный объект предприятия, для которого разрабатывается плановое задание, рассматривается как некоторый «рабочий центр». В настоящей главе рассматривается планирование для рабочих центров, представляющих собой производственные бригады. Производственные бригады создаются для сборки сложных машин, ремонта оборудования, перемещения производства на другую территорию и т.п. Каждая такая бригада представляет собой постоянный или временный коллектив сотрудников, выполняющих общую работу (заказ) и несущих совместную ответственность за результаты своего труда.

Члены бригады могут иметь как одинаковую, так и различные профессии. В зависимости от этого различаются специализированные или комплексные бригады. Каждая работа может состоять из нескольких задач (операций) различного вида, для выполнения которых требуются работники соответствующих специальностей. В зависимости от соответствия видов задач и специальностей членов бригады, комплексная бригада может выполнить полностью всю работу или ее часть; специализированная бригада может выполнить только соответствующую задачу из всей работы.

Главным достоинством использования бригад в качестве рабочих центров является большая гибкость в таких системах. При проведении планирования возможны два вида гибкости. Маршрутной гибкостью называется возможность выбора двух или более рабочих центров для выполнения заданной операции. По классификации [Blackburn and Millen, 1986] этот вид гибкости относится к «жесткой» гибкости. Другой вид гибкости, называемый гибкостью последовательности, заключается в возможности изменения порядка выполнения операций в рамках одной работы, и относится к «мягкой гибкости». Возможность назначить при планировании для выполнения конкретной работы одну из нескольких комплексных бригад обеспечивает маршрутную гибкость планирования. В то же время, последовательность операций по выполнению этой работы может изменяться по соглашению между членами бригады в зависимости от различных факторов: загруженности членов бригады, готовности объектов и т.п.

Для загрузки бригад необходимо как объемно-календарное, так и ежедневное планирование, однако составление ежедневных планов проводится внутри самих рабочих центров. План

составляется начальником предметно-замкнутого участка или бригадиром с тем или иным участием остальных сотрудников рабочего центра. Такое участие совершенно необходимо при работе бригады, т.к. ее руководителю зачастую трудно установить степень загрузки каждого члена бригады и ожидаемые сроки завершения проводимых бригадой работ.

Поэтому единственно возможным вариантом производственного планирования является сочетание расписания заданий для всех бригад на плановый период (неделю, месяц) и ежедневного плана, составляемого самостоятельно каждой бригадой. Поскольку для выполнения конкретной планируемой работы может привлекаться несколько бригад с различной специализацией, последовательность их работы может быть установлена только непосредственно между их руководителями и может меняться в зависимости от ситуации.

Если рассматривать производственные бригады как «машин», то с точки зрения классификации плановых задач, имеет место набор таких машин с заранее неопределенной последовательностью их использования. Возможность выбора нескольких бригад для выполнения одной операции обеспечивает гибкость этого набора машин.

Естественно, чем лучше составлено предварительное расписание, тем меньше необходимость в его пересмотре и ежедневной корректировке. Качество расписания зависит от набора данных, имеющегося в распоряжении плановика в момент планирования, и от алгоритма планирования. Здесь, как и в предыдущих главах книги, для оценки качества планирования используется критерий средней полезности заказов.

Положим, что на участок (цех) в любой последовательности поступают различные работы, прибытие которых запланировано в различное время  $t_i$ . При этом каждая  $i$ -ая работа содержит  $R_i$  компонентов различного вида (операций). Задание дат окончания работ со сроком выполнения  $d_i$  характерно для производственной стратегии «под заказ». Ниже перечислены основные допущения для планирования.

Положим, что на объекте планирования (предприятии, судне, здании и т.п.) в течение некоторого времени после запланированного начала необходимо выполнить  $n$  различных работ. Горизонт времени планирования для постоянно работающего предприятия обычно равен некоторому отчетному периоду – например, месяцу или кварталу. При постройке судна или здания горизонт может устанавливаться либо по отчетному периоду, либо на весь период строительства. Положим также, что каждая из работ может быть выполнена одной или несколькими производственными бригадами, общее количество которых равно  $M$ . Каждая  $i$ -ая работа содержит несколько задач (операций) и должна быть выполнена к моменту  $d_i$ .

Допущения:

- а) Последовательность выполнения задач (операций) одной работы в рамках настоящего планирования во внимание не принимается. В общем случае эти задачи могут выполняться в любой последовательности.
- б) Для каждой работы может быть установлен свой коэффициент приоритета.
- в) Время поступления каждой работы известно.
- г) Каждая работа может одновременно проводиться на любом количестве рабочих центров (бригад).
- д) Процессное время выполнения всей работы и каждой из составляющих ее задач известно и детерминировано.
- е) Продолжительность выполнения всей работы устанавливается нормативно.
- ж) Для каждой работы одна из задач определенного вида является основной.
- з) В начальный момент времени известно, какая работа выполняется каждой бригадой, и в какой момент времени она будет закончена.

Согласно известной трехэлементной классификации теории расписаний, рассматриваемая задача может быть записана как

$$FO|d_i, r_i|\bar{V}, \quad (11.1)$$

где  $FO$  – обозначение задачи (Flexible Open Shop), в которой возможен любой порядок выполнения различных работ несколькими параллельно действующими бригадами. Поскольку алгоритм решения здесь несколько отличается от алгоритма в предыдущих главах, он приведен ниже.

Для решения задачи 11.1 целесообразно воспользоваться т.н. «жадным» подходом, в котором обычно на каждом шаге делается выбор, при котором критерий имеет наилучшее значение. В задачах, которых критерием является средняя полезность  $\bar{V}$ , дополнительным условием (Мауэргауз, 2012) отбора является требуемая дата запуска работы  $g_i$ . Поскольку количество условий отбора решений, допустимых на каждом шаге, равно двум, то количество таких решений (узлов) может быть больше единицы. Соответственно дерево решений содержит ветви, исходящие из каждого узла. При этом на каждом шаге отбираются несколько вариантов возможных решений, не доминирующих друг друга, используя следующий алгоритм.

**Шаг 1** Начальные установки планирования

Положим номер уровня  $l = 0$ , количество узлов  $Z_0 = 1$ .

**ВНЕШНИЙ ЦИКЛ**

**Шаг 2** Определение возможных работ на следующих уровнях

Для каждого узла  $z$  построенного дерева на уровне  $l$  устанавливаются возможные работы  $k$  на уровне  $l + 1$  и определяются значения необходимого момента запуска  $g_k$  при помощи формулы 3.28.

**СРЕДНИЙ ЦИКЛ** Определение необходимых бригад на следующих уровнях

**Шаг 3** Для каждой возможной работы определяется семейство бригад  $S_i$ , способных выполнять задачу основного вида для этой работы.

**Шаг 4** Для каждой возможной работы определяются наименее загруженные бригады, способные выполнять задачи, не являющиеся основными для этой работы.

**ВНУТРЕННИЙ ЦИКЛ** Расчет функций полезности на следующих уровнях

**Шаг 5** Для каждой  $m$ -ой бригады, относящейся к семейству бригад  $S_i$ , определяем  $\bar{V}_{l+1,k,m}$  по формулам (3.20, 3.26).

**КОНЕЦ ВНУТРЕННЕГО ЦИКЛА**

**КОНЕЦ СРЕДНЕГО ЦИКЛА**

**Шаг 6** Определение доминируемых узлов дерева

**ЕСЛИ** уровень  $i + 1$  не является последним

**ТО** для доминирования на  $l + 1$ -ом уровне возможного узла  $y$  дерева над возможным узлом  $x$  необходимо, чтобы соблюдались неравенства

$$\bar{V}_{l+1,y} \geq \bar{V}_{l+1,x} \text{ и } g_{l+1,y} < g_{l+1,x}, \quad (11.2)$$

ИНАЧЕ для доминирования на последнем уровне  $l + 1$  необходимо, чтобы

$$\bar{V}_{l+1,y} \geq \bar{V}_{l+1,x}, \quad (11.3)$$

**Шаг 7** Переход на новый уровень или окончание работы программы

ЕСЛИ уровень больше последнего (выполнены все операции)

ТО окончание работы

ИНАЧЕ увеличение номера уровня  $l = l + 1$  и переход на **ШАГ 2**.

**КОНЕЦ ВНЕШНЕГО ЦИКЛА**

## 11.2 Исходные данные задачи

Исходные данные для составления расписания записываются на листе MS Excel электронной книги MBook12.xls, состоящей из двух листов. На листе 1 в табл. \$A\$5:\$O\$44 находится задание, состоящее из 40 работ, фрагмент которого приведен на рис. 11.1. Работы включают 5 возможных компонентов (видов работ), которые могут выполняться в самом различном порядке.

Для каждой работы указывается директивный срок выполнения в календарных днях, а также первый возможный день начала работы. Для работы возможно установить период, когда по каким-либо причинам выполнение этой работы нежелательно – для этого используются колонки нижнего и верхнего пределов недоступности.

Полная трудоемкость работы измеряется в нормочасах, а нормативная длительность – в рабочих днях. Один из компонентов работы указывается в качестве ведущего. Такой компонент либо наиболее трудоемкий, либо наиболее важный с точки зрения качества работы. Важность своевременного выполнения работы может быть усилена с помощью весового коэффициента. Если к моменту планирования работа уже была начата, но не закончена, отметка выполнения равна 0,5.

Обозначение (№ работы)	Требуемый календарный день готовности после начала	Первый возможный день начала работы	Нижний предел недоступности	Верхний предел недоступности	Полная трудоемкость в нормочасах	Ведущий вид работ	Нормативная длительность работы, рабочие дни	Весовой коэффициент	Отметка выполнения	Процент трудоемкости по видам работ				
										1	2	3	4	5
1	-2	0	0	0	50	1	4	1	0,5	80	20	0	0	0
2	3	0	0	0	200	1	10	1	0,5	60	10	30	0	0
3	5	0	0	0	50	5	4	1	0,5	0	0	0	20	80
4	5	0	0	0	150	1	10	1	0,5	50	20	20	10	0
5	7	0	0	0	100	2	7	1	0,5	40	40	0	0	20
6	9	0	0	0	50	5	4	1	0	40	0	20	0	40
7	9	0	0	0	150	3	10	1	0	20	10	30	40	0
8	12	0	0	0	100	1	7	1	0	70	0	30	0	0
9	12	8	0	0	50	2	4	1	0	20	80	0	0	0
10	14	8	0	0	150	2	10	1	0	60	40	0	0	0
11	14	8	0	0	100	3	7	1	0	50	0	40	0	10

Рис. 11.1 Фрагмент исходного задания для производственных бригад

В данном примере работы могут выполняться пятью бригадами, состав которых обладает различными возможностями (рис. 11.2). Максимальная производительность по виду работ в бригаде устанавливается по количеству персонала соответствующей специальности для 8-часовой работы. Бригады 1, 2 и 3 являются комплексными, а бригады 4 и 5 – специализированными, т.е. предназначены для только одного вида работ. Наибольшей суммарной производительностью, равной 40 часов/день, отличается бригада 2.

При проведении планирования необходимо учесть, что производительность бригад в течение последующих недель может отклоняться от максимальных значений, приведенных на рис. 11.2, т.к. часть сотрудников может по тем или иным причинам отсутствовать. На рис. 11.3 приведены величины ожидаемой производительности в бригадах на горизонте планирования в 8 недель в процентах от максимально возможных значений. Все описанные таблицы помещаются на лист MS Excel.

Для проведения планирования необходимо иметь данные о состоянии выполнения уже начатых работ на момент планирования (рис. 11.4). Если компонент работы должен быть выполнен, но еще это выполнение не началось, в соответствующей графе проставляется число -1. На листе также описан календарный график работы машины по дням, начинающийся с первого

Виды работ	Максимальная производительность бригад нчас/день				
	Бригада 1	Бригада 2	Бригада 3	Бригада 4	Бригада 5
1 механосборочные	24	16	16	0	0
2 электромонтажные	8	16	8	0	0
3 приборные	0	8	8	0	0
4 строительные	0	0	0	16	0
5 транспортные	0	0	0	0	16

Рис. 11.2 Максимальная производительность бригад по видам работ

Недельный календарь, начиная с	13.10.16 8:00		Процент плановой производительности по неделям							
	Номер бригады	Вид работы	1	2	3	4	5	6	7	8
	1	1	80	60	60	60	80	80	80	80
1	2	60	90	90	90	90	90	90	90	90
2	1	80	80	80	80	80	80	80	80	80
2	2	80	80	80	80	0	0	0	0	80
2	3	90	90	90	90	90	90	90	90	90
3	1	40	80	80	80	80	80	80	80	80
3	2	90	90	90	90	90	90	90	90	90
3	3	90	90	90	90	90	90	90	90	90
4	4	80	80	80	80	80	80	80	80	40
5	5	80	80	80	80	80	80	80	80	80

Рис. 11.3 Плановая производительность бригад по видам работ

Состояние бригад на	13.10.16 8:00	Проценты выполнения работ в бригаде						
		Номер работы	Вид работы	1	2	3	4	5
		1	1	0	80	0	0	0
		1	2	0	-1	0	0	0
		2	1	20	0	0	0	0
		2	2	20	0	0	0	0
		2	3	0	-1	0	0	0
		3	4	0	0	0	-1	0
		3	5	0	0	0	0	80
		4	1	0	0	70	0	0
		4	2	0	0	100	0	0
		4	3	0	0	-1	0	0
		4	4	0	0	0	100	0
		5	1	0	30	0	0	0
		5	2	0	70	0	0	0
		5	5	0	0	0	0	60

**Рис. 11.4** Выполнение начатых работ на момент планирования в процентах

дня выполнения составляемого расписания. Для каждой смены календарного дня проставлено количество рабочих часов. В приведенном примере предусмотрена двухсменная работа с восьмичасовым рабочим днем.

### 11.3 Работа с программой

Для работы с программой планирования в MS Excel устанавливается соответствующий рабочий лист, например, лист 1 и осуществляется запуск макроса. В форме «Ввод данных» задаются основные параметры процесса. По окончании расчета, расписание выводится на лист (рис. 11.5).

Числа в последовательности для каждой работы показывают календарные дни начала и окончания выполнения соответствующих работ, определенные с учетом рабочего календаря. Числа, взятые в скобки – номера бригад, участвующих в выполнении работ, причем первой записывается бригада, выполняющая ведущий компонент работы.

Плановая загрузка бригад в течение ближайших восьми недель приведена на рис. 11.6. Из рис. 11.6 следует, что в данном случае в течение первых четырех недель загрузка не превышает 80%, на пятой неделе бригада оказывается нагруженной почти на 100%. В дальнейшем полная загрузка (без учета распределения по видам работ) находится в допустимых пределах.

План работ по датам начала и окончания.  
Первая бригада в скобках -ведущая, остальные дополнительные

Работа 1: 1 - 6 (2)	
Работа 2: 0 - 14 (1,2)	
Работа 3: 0 - 2 (5,4)	
Работа 4: 0 - 13 (3)	
Работа 5: 1 - 9 (2,5)	
Работа 6: 22 - 28 (5,3)	
Работа 7: 0 - 14 (2,4)	
Работа 8: 13 - 22 (1,3)	
Работа 9: 28 - 34 (2)	
Работа 10: 13 - 27 (1)	
Работа 11: 9 - 19 (2,5)	
Работа 12: 61 - 71 (2,4,5)	
Работа 13: 14 - 20 (2,4)	
Работа 14: 36 - 45 (5,3)	
Работа 15: 30 - 36 (2,4)	

Рис. 11.5 Фрагмент расписания работ по бригадам

Недели	Еженедельная загрузка бригад в процентах мощности							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Бригада 1:	29	56	78	44	0	0	0	0
Бригада 2:	56	72	48	29	98	12	60	86
Бригада 3:	0	38	44	28	14	30	31	31
Бригада 4:	42	38	19	31	44	31	28	48
Бригада 5:	9	10	6	25	16	75	35	38

Рис. 11.6 Фрагмент загрузки бригад по неделям

## 11.4 Анализ результатов планирования

На рис. 11.7 показан фрагмент загрузки бригад в течение ближайших восьми недель.

Загрузка бригады на каждую неделю ограничивается знаком «;». В начале в скобках приводится перечень работ, запланированных для бригады на текущую неделю, после чего (через дробь), приводится полная загрузка бригады без разделения по видам работ. Затем по каждому виду работ в бригаде, через дробь, приводится соответствующая загрузка.

Бригада 1: (2,29)1/33 2/18 ; (2,10,8)5/56 1/62 2/36 ; (10,8)7/78 1/79 2/75 ; (10,8)4/44 1/38 2/60 ; (0) ; (0) ; (0) ; (0) ; (0) ; (0) ; (0) ; (38)22 1/30 ;  
 Бригада 2: (1,2,5,7)5/56 1/48 2/31 3/118 ; (2,5,7,11)7/72 1/64 2/15 3/198 ; (11,13,24)4/48 1/66 2/9 3/90 ; (24,9,20)2/29 1/52 2/10 3/20 ;  
 (9,39,20,15,22)9/98 1/89 2/109 3/88 ; (15,22,28)1/12 1/6 2/18 3/18 ; (28,31,16,17,25)6/60 1/60 2/50 3/80 ; (31,16,17,25)8/86 1/89 2/79 3/90 ;  
 Бригада 3: (0) ; (4,8)3/38 1/38 3/78 ; (8)4/44 1/62 3/52 ; (8,6)2/28 1/38 3/35 ; (35)1/14 1/28 ; (35,14)3/30 1/45 3/32 ; (14,40)3/31 1/42 3/40 ; (40,27)3/31 1/48 3/28 ;  
 Бригада 4: (7,3)4/42 4/42 ; (7)3/38 4/38 ; (13,24)1/19 4/19 ; (24)3/31 4/31 ; (15,35)4/44 4/44 ; (15,18,35)3/31 4/31 ; (16,40)2/28 4/28 ; (16,40)4/48 4/48 ;  
 Бригада 5: (5,3)9 5/9 ; (5,11)1/10 5/10 ; (11)6 5/6 ; (6)2/25 5/25 ; (39,22)1/16 5/16 ; (22,18,28,14)7/75 5/75 ; (28,14,16)3/35 5/35 ; (16,27)3/38 5/38 ;

Рис. 11.7 Фрагмент загрузки бригад на восемь недель

Например, на первую неделю для бригады 2 планируется список из четырех работ 1, 2, 5 и 7, причем полная загрузка (без разделения по видам работ) бригады 2 составляет 56%. Затем на рис. 11.7 приводятся данные по загрузке каждого вида работ, из которых следует, что загрузка вида 1 равна 40%, вида 2 – 31%, а вида 3 – 118%. Таким образом, бригада 2, несмотря на приемлемую общую загрузку в 56%, явно перегружена по третьему виду работ.

Система обеспечивает вывод диаграммы загрузки бригад (рис. 11.8).

По оси абсцисс на рис. 11.8 откладываются недели планирования. Для каждой недели отрезок разбивается на несколько частей по отдельным видам работ, номера которых указываются для каждой такой части. Цвет такого номера определяется по уровню загрузки соответствующего вида работ: зеленый цвет используется, если загрузка меньше 50%, черный цвет – если загрузка составляет в пределах от 50 до 100%, и красный цвет – если загрузка больше 100%.

Ордината линии загрузки устанавливается в зависимости от полной загрузки бригады: если загрузка находится в пределах от 50 до 100%, то ордината считается равной 1; при меньшей загрузке ордината принимается равной 0,8; при величине большей 100% ордината полной загрузки бригады считается равной 1,2.

Сверху над линией загрузки приводится список работ, выполняемых бригадой на текущей неделе. Если список работ текущей недели сохраняется после предыдущей недели, то такой список опускается. Например, для бригады 1 на первой неделе проводятся работы видов 1 и 2, причем как полная загрузка бригады, так загрузка по отдельным видам работ невелика. Поэтому цифры видов работ записываются зеленым цветом, а линия загрузки бригады имеет ординату 0,8. Такая небольшая загрузка объясняется тем, что список выполняемых работ состоит только из одной работы 2.

На второй неделе загрузка бригады 1 увеличивается, т.к. в списке уже находятся 3 работы – 2, 10 и 8. Соответственно ордината линии загрузки становится равной 1, и меняется цвет вида работ 1 с зеленого на черный. На третьей неделе работа 2 уже отсутствует, однако загрузка

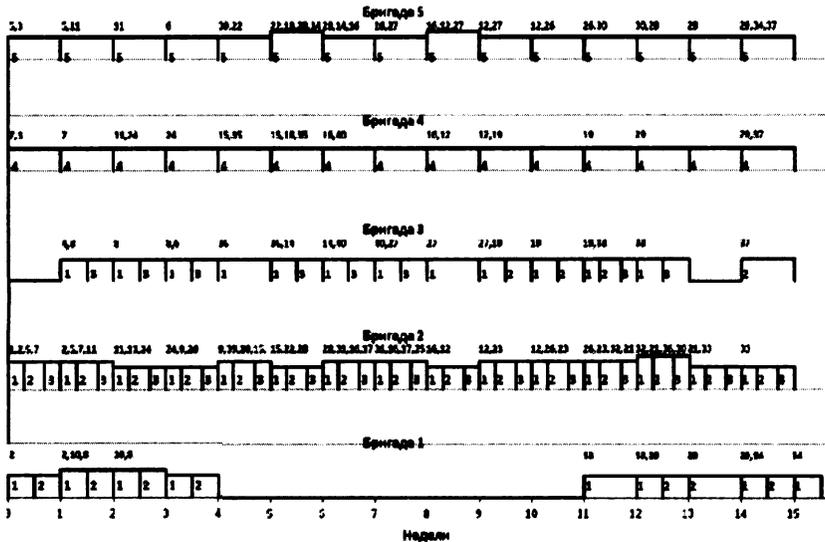


Рис. 11.8 Диаграмма загрузки бригад

остается достаточно велика за счет работ 10 и 8. На четвертой неделе бригада 1 заканчивает выполнение предыдущих работ 10 и 8, полная загрузка бригады уменьшается, хотя по виду работ 2 она еще остается значительной. С пятой по одиннадцатую неделю загрузка по бригаде 1 не планируется, а дальше она возможна с относительно небольшой загрузкой.

Для бригады 2, в отличие от бригады 1, запланирована существенно большая загрузка. Дело в том, что бригада 2 имеет в своем составе специалиста (рис. 11.2), который может выполнять приборные работы (вид работ 3). Более того, оказывается, что загрузка по этому виду работ достаточно велика. Например, на первой неделе полная загрузка всей бригады 2 имеет ординату, равную 1, хотя загрузка по видам работ 1 и 2 невелика и эти цифры имеют зеленый цвет. В то же время загрузка по виду 3 превышает 100% и соответствующая цифра окрашена в красный цвет.

В дальнейшем ординаты линии загрузки для бригады 3 колеблются между значениями 0,8 и 1, а на неделе 13 становится даже равной 1,2. При этом вид работ 3 несколько раз окрашивается в красный цвет, что явно указывает на перегрузку по этому виду работ.

Для бригад 3, 4 и 5 запланирована относительно равномерная загрузка. В целом, планирование загрузки специализированных бригад осуществляется проще, чем для комплексных. Более подробно загрузку бригад по видам работ можно изучать по рис. 11.9.

Еженедельная загрузка бригад в часах по видам работ								
Недели	1	2	3	4	5	6	7	8
Бригада 1 Вид работы 1:	40	75	95	46	0	0	0	0
Бригада 1 Вид работы 2:	7	15	30	24	0	0	0	0
Бригада 2 Вид работы 1:	38	51	52	42	71	5	48	71
Бригада 2 Вид работы 2:	25	12	7	8	87	14	40	63
Бригада 2 Вид работы 3:	47	79	36	8	35	7	32	36
Бригада 3 Вид работы 1:	0	30	50	30	22	36	34	38
Бригада 3 Вид работы 2:	0	0	0	0	0	0	0	0
Бригада 3 Вид работы 3:	0	31	21	14	0	13	16	11
Бригада 4 Вид работы 4:	34	30	15	25	35	25	22	38
Бригада 5 Вид работы 5:	7	8	5	20	13	60	28	30

Рис. 11.9 Фрагмент еженедельной загрузки бригад по видам работ

Из рис. 11.9 видно, что плановая загрузка бригады 3 по виду работ 3 на неделе 2 составляет 79 часов, тогда как максимальная производительность по этому виду (рис. 11.2) составляет 8 часов/рабочий день. Очевидно, такие результаты требуют корректировки.

## 11.5 Листинг основной части программы

На каждом уровне построения дерева расписания используются 4 основных массива: *VStage()*, *ParStage()*, *CompStage()*, *NPStage()*, которые имеют назначение, совпадающее с назначением аналогичных массивов в главе 5. Вместо массива машин в узлах используется массив *BrigStage()*, в который записываются номера ведущих бригад в узлах на текущем уровне.

Для расчета полезности заказов на каждом уровне необходима информация о загрузке каждой бригады в узлах строящегося дерева. В отличие от всех ранее описанных задач, где в каждом узле участвовала только одна машина, здесь в одном узле могут использоваться параллельно сразу несколько бригад. Поэтому соответствующий массив загрузки *MachStage()*

является двумерным – по номерам узлов и номерам бригад. Такой массив, однако, нельзя в рамках языка VBA непосредственно перезаписать в совокупность параметров недоминируемых узлов строящегося дерева.

Поэтому на каждом уровне массив загрузки бригад в разветвляемых узлах запоминается во вспомогательном массиве *PBrig()*. Массив загрузки *MachStage()* на каждом уровне организуется в два приема: сначала из массива *PBrig()* переписываются данные предыдущего уровня, которые затем дополняются данными текущего уровня.

Поскольку для каждой операции могут применяться несколько параллельных бригад, приходится использовать дополнительный массив *FStage()*. Для дальнейшего построения ветвей дерева путем перезаписи значений параметров недоминируемых узлов по аналогии с предыдущими задачами используются массивы *V()*, *Par()*, *Comp()*, *NP()*, *Mach()*, *FComp()*. Программа автоматически переносит данные с листа в переменные и массивы. На рис. 11.10 приведена программа определения массивов начальной загрузки бригад *Mach0* и номеров ведущих бригад *VBrig*, а на рис. 11.11 – определение массива остающейся трудоемкости по каждой из работ.

Расчет основных параметров узлов первого уровня по всему количеству заказов производится в цикле отдельно по начатым (рис. 11.12) и еще не начатым работам. Значительное место

```

UpperLeft1 = Cells(1, "J").Value 'Имя первой ячейки списка работ
LowerRight1 = Cells(1, "K").Value 'Имя последней ячейки списка работ
Beta = Range(UpperLeft1, LowerRight1).Rows.Count 'количество работ'
...
For i = 1 To Beta 'определение загрузок бригад в начале планирования'
  If ex(i) = 0.5 Then ' для начатых работ
    For J = 1 To Sigma 'по строкам начатых работ
      If K0(J, 1) = 1 Then ' для текущей работы
        m = K0(J, 2) 'вид работы
        Ehes = p(i) * Vid(1, m) / 100 'полная трудоемкость по виду работы
        For k = 1 To Nbrach 'по всем бригадам
          If K0(J, k + 2) > 0 Then 'для начатого вида работ
            Mach0(1, k) = Mach0(1, k) + Ehes * (100 - K0(J, k + 2)) / 100
            'остающаяся трудоемкость работы для рабочего центра k
            Wip(k) = Wip(k) + Mach0(1, k) 'начальная загрузка бригады по начатым работам в час
            If m = VVid(1) Then 'если вид работы ведущий
              VBrig(1) = k 'номер ведущей бригады
            End If
          Else
            If K0(J, k + 2) = -1 Then ' для неначатого вида работ
              Mach0(1, k) = Mach0(1, k) + Ehes
              'трудоемкость в часах, если работа текущего вида не начиналась
              Wip(k) = Wip(k) + Mach0(1, k)
              'начальная загрузка бригады - добавка по неначатым работам
              If m = VVid(1) Then 'если вид работы ведущий
                VBrig(1) = k 'номер ведущей бригады
              End If
            End If
          End If
        Next k
      End If
    Next J
  End If
Next i

```

Рис. 11.10 Определение массивов загрузки бригад

```

m = 0
Ехес = 0
For J = 1 To Sigma ' по строкам начального состояния
  m = K0(J, 1) 'Номер работы
  l = K0(J, 2) ' Вид работы
  sngPk = p(m) * Vid(m, 1) / 100 'трудоемкость по виду работы
  Ехес = 0
  For i = 1 To Nvid 'по бригадам
    If K0(J, i + 2) > 0 Then 'если процент выполнения работы больше нуля
      Ехес = Ехес + sngPk * K0(J, i + 2) / 100 'уже выполненные работы
    End If
  Next i
  p(m) = p0(m) - Ехес 'действующая трудоемкость
Next J

```

Рис. 11.11 Определение массивов оставшейся трудоемкости работ

```

N = 0
For i = 1 To Beta 'строится узел первого уровня с i-ой выполняемой работой '
  If ех(i) = 0.5 Then 'для начатых работ
    N = N + 1 'новый узел
    аJ(i) = 0.5 'метка выполняемой работы
    Tk(N) = r(i) 'возможный момент начала работы в календарных днях
    If Tk(N) >= SInt(i) And Tk(N) < FInt(i) Then
      'если начало работы находится в пределах недопустимого интервала
      Tk(N) = FInt(i)
    End If
    sngCk = Tk(N) + p(i) / p0(i) * Dur(i) * 1.4 'предварительный момент выполнения в календарных днях
    If Tk(N) < SInt(i) And sngCk > SInt(i) + Dur(i) / 2 Then
      ' если работа начинается раньше недопустимого интервала, а кончается позже его середины
      Tk(N) = FInt(i) 'переход на конец недопустимого интервала
    End If
    sngCk = Tk(N) + p(i) / p0(i) * Dur(i) * 1.4 'предварительный момент выполнения в календарных днях
    m1 = 1 + Int(Tk(N) / 7) ' первая неделя выполнения работы
    m2 = 1 + Int(sngCk / 7) 'последняя неделя выполнения работы
    If m2 > Omega - 2 Then 'ограничение по последней неделе в календаре
      m2 = Omega - 2
    End If
    If m1 > m2 Then ' возможно в случае последней недели в календаре
      m1 = m2 'начало и конец устанавливаются на одну неделю
    End If
    For k = 1 To NМаск
      FondV(k) = BrigFond(Kappa, k, m1, m2)
      'средней расчетной производительности бригады часов/день для недель выполнения оставшейся загрузки
    Next k
    tGamma = 0
    For k = 1 To NМаск
      MachStage(N, k) = Mach0(i, k) 'загрузка по бригадам в узле в час
      If Mach0(i, k) > 0 Then 'для бригад, участвующих в выполнении текущей работы
        tGamma = tGamma + FondV(k) 'накопление расчетной производительности для всех участников
      End If
    Next k
    sngPk = Tk(N) + p(i) * 1.4 / tGamma
    ' расчетный момент выполнения по фонду времени в бригадах в календарных днях
    If sngCk > sngPk Then ' больший момент выполнения (предварительный или расчетный)
      CompStage(N) = Round(sngCk, 1) ' момент выполнения в календарных днях
    Else
      CompStage(N) = Round(sngPk, 1) ' момент выполнения в календарных днях
    End If
    VZstage(N) = VZak(Beta, i, 0, Tk(N), CompStage(N)) / (CompStage(N) * 24) 'полезность набора работ
    ParStage(N) = 0 'рождельской узел 0
    NPStage(N) = 1 'работа в узле 1
    BrigStage(N) = VBrig(i) ' номер ведущей бригады в узле
    аJ(i) = 1 'возврат метки выполняемой работы
    ...
  End If
Next i

```

Рис. 11.12 Расчет параметров узлов первого уровня для начатых работ

в этом расчете занимает определение возможного момента начала (продолжения) текущей работы.

Возможное начало  $Tk$  проверяется по границам недопустимого интервала, а затем проводится расчет момента завершения работы  $CompStage$  двумя способами. Сначала по величине остающейся трудоемкости  $p$  и нормативу на выполнение работы  $Dur$  устанавливается предварительный момент выполнения  $sngCk$  в календарных днях. Для учета количества рабочих дней в неделе, величина  $Dur$ , заданная в рабочих днях, умножается на коэффициент 1,4.

Затем для установленного значения  $Tk$  определяются недели выполнения работы, и для этих недель определяется средняя расчетная производительность  $FondV$  по каждой бригаде. Для бригад, участвующих в выполнении текущей работы рассчитывается их суммарная производительность  $tGamma$ , что позволяет определить возможный момент окончания работы по производительности бригад  $snPk$ . В результате, расчетный момент окончания работы устанавливается по наибольшему значению  $sngCk$  и  $sngPk$ .

На рис. 11.13 приведена функция  $VZak()$  расчета полезности набора работ. Для правильного применения функции  $Vybor$  и используемых в ней функций  $H1 - H9$  (глава 4), входящие параметры пересчитываются в календарные часы.

Расчет параметров возможных ведущих бригад для узлов первого уровня по не начатым работам приведен на рис. 11.14.

Для каждой возможной по ведущему виду работы  $VVid$  бригады  $BrigStage$  определяется предварительный момент выполнения  $sngCk$  и накапливается трудоемкость по всем видам выполняемых работ  $MachStage$ . Затем устанавливаются возможные дополнительные бригады, которые должны проводить виду работ, не обеспечиваемые ведущими бригадами (рис. 11.15).

Для каждой бригады, которая способна выполнить необходимый вид работы, рассчитывается ее плановая производительность в течение недель планового выполнения текущей работы  $sngPk$ . Из всех возможных таких бригад отбирается та, которая обеспечивает наименьшую длительность выполнения необходимого вида текущей работы. Дальнейшее определение параметров новых работ не отличается от рис. 11.12.

Отбор недоминируемых узлов на первом уровне (рис. 11.16) отличается от аналогичной процедуры в предыдущих главах только отсутствием функции трудоемкости переналадок  $UStage$ . Перенос параметров на первом уровне в полные массивы недоминируемых узлов дерева решений, как указывалось выше, усложняется из-за необходимости использования двумерного массива загрузки бригад  $MachStage$  (рис. 11.17). Массив  $PBrig$  затем используется для определения массива  $Mach$  на последующем уровне.

На последующих уровнях  $intY$  построения дерева решений все этапы программы первого уровня повторяются с рядом изменений. В каждом узле ветвления  $intZ$  запоминается расчетная полезность в созданном узле  $sngVz$ , номер ведущей бригады в узле  $intNp$ , фиктивной расчет-

```
Function VZak(inBeta, ink, snCl, snTk, snFk)
VZak = 0 'ink - номер работы, исходящей из текущего узла дерева
sngT = snTk * 24 'плановый момент начала работы в календарных часах
sngF = snFk * 24 'плановый момент окончания работы в календарных часах
sngC = snCl * 24 'момент выполнения последней работы ведущей бригадой
For i = 1 To inBeta 'по всем работам
    sngD = d(i) * 24 'директивный момент выполнения работы
    VZak = VZak + Vybor(aJ(i), W(i), p(i), p(ink), sngD, sngC, sngT, sngF)
Next i
End Function
```

Рис. 11.13 Функция полезности набора работ

```

For i = 1 To Beta 'строится узел первого уровня с i-ой выполняемой работой '
If ex(i) = 0.5 Then 'для начатых работ
...
Else ' для неначатых работ
aJ(i) = 0.5 'метка выполняемой работы
For k = 1 To MMax 'установка ведущей бригады
If Cap(VVid(i), k) > 0 Then 'если мощность бригады по ведущему виду работы больше 0
M = M + 1 'номер узла
Tk(M) = r(i) ' разрешенный момент начала работы
If Tk(M) >= SInt(i) And Tk(M) < FInt(i) Then
'если момент начала попадает в запрещенную область времени выполнения
Tk(M) = FInt(i) 'установка на конец запрещенной области
End If
sngCk = Tk(M) + Dur(i) * 1.4 'предварительный момент выполнения планируемой работы
'(ветвь дерева) в календарных днях (грубый учет выходных дней с коэффициентом 1.4)
If Tk(M) < SInt(i) And sngCk > SInt(i) + Dur(i) / 2 Then
'если начало до запрещенной области, а конец после середины этой области
Tk(M) = FInt(i) 'установка на конец запрещенной области
End If
sngCk = Tk(M) + Dur(i) * 1.4 'предварительный момент выполнения планируемой работы
m1 = 1 + Int(Tk(M) / 7) ' первая неделя выполнения работы
m2 = 1 + Int(sngCk / 7) 'последняя неделя выполнения работы
If m2 > Omega - 2 Then 'ограничение по последней неделе в календаре
m2 = Omega - 2
End If
If m1 > m2 Then ' возможно в случае последней недели в календаре
m1 = m2 'начало и конец устанавливаются на одну неделю
End If
Exes = 0
For J = 1 To MVID 'по всем видам работ
If Cap(J, k) > 0 Then 'если вид работы выполняется ведущей бригадой
Exes = Exes + p(i) * Vid(i, J) / 100
'накопление трудоемкости бригады по всем видам выполняемых ей работ
End If
Next J
BrigStage(M) = k 'номер ведущей бригады в узле первого уровня
MachStage(M, k) = Exes 'запоминание трудоемкости ведущей бригады в узле в мчас
...
Next k
aJ(i) = 1 'возврат метки выполняемой работы
End If
Next i

```

Рис. 11.14 Определение параметров возможных ведущих бригад для новой работы

ной длительности в узле  $sngCz$ , а также наибольшее значение количества недель в цепочке  $m$ .

Для каждой недели выполнения в цепочке рассчитывается загрузка по каждой бригаде в виде соответствующего двумерного массива  $HBrig$  (рис. 11.18). Расчет параметров узлов уровня  $intY$  как для начатых работ, так и для новых работ, а также отбор недоминируемых значений, проводится примерно так, как на первом уровне. Перенос недоминируемых параметров в дерево несколько усложняется (рис. 11.19).

По окончании расчета программа выводит полученные результаты на лист и формы MS Excel (рис. 11.5 – 11.9). Для этих целей используется двумерный массив  $PBrig$  понедельной полной загрузки бригад в процентах, двумерный массив  $SBrig$  еженедельных списков работ, двумерный массив  $HBrig$  недельной загрузки бригад по видам работ в нормочасах. Данные в массивах восстанавливаются при помощи цепочки дерева работ.

```

For J = 1 To Nvid ' определение дополнительных бригад и их загрузки в узлах первого уровня
If Vid(1, J) > 0 And Cap(J, k) = 0 Then 'если вид работы не выполняется ведущей бригадой
x = 0 'номер дополнительной бригады
Exec = 0 'производительность первой встречающейся дополнительной бригады
sngPк = 0 'производительность следующей дополнительной бригады
For y = 1 To Nmach 'поиск дополнительных бригад по признаку
'наименьшего срока возможного выполнения в текущем виде работ в диапазоне недель
If Cap(J, y) > 0 Then 'если вид работы выполняется дополнительной бригадой
l = Detexn(Карта, y, J) 'номер строки в недельном календаре
If l > 0 Then 'если строка найдена
If x = 0 Then 'начало
For z = m1 To m2 'по неделям выполнения
Exec = Exec + Cap(J, y) * Avail(1, z + 2) / 100 ' накопление значения расчетной
'производительности для предыдущей в списке бригады ичас/за недели выполнения работы
Next z
x = y ' номер бригады
If Exec > 0 Then
Exec = Wip(y) / Exec 'длительность выполнения
'уже запланированных работ для дополнительной бригады в рабочих днях
End If
Else
For z = m1 To m2
sngPк = sngPк + Cap(J, y) * Avail(1, z + 2) / 100 ' накопление значения расчетной
'производительности для последующей в списке бригады ичас/за недели выполнения работы
Next z
If sngPк > 0 Then
sngPк = Wip(y) / sngPк 'длительность выполнения уже запланированных
'работ следующей дополнительной бригадой
End If
End If
If sngPк > 0 And sngPк < Exec Then 'поиск бригады с наименьшей длительностью
'раннее запланированных работ
Exec = sngPк
x = y 'запоминание номера дополнительной бригады
End If
End If
End If
Next y
MachStage(M, x) = MachStage(M, x) + p(1) * Vid(1, J) / 100
'запоминание трудоемкости каждой дополнительной бригады в узле
End If
Next J

```

Рис. 11.15 Подбор дополнительных бригад

```

intU = N 'начальное возможное количество узлов разветвления на первом уровне'
intN = intU 'наибольшее возможное количество разветвляемых узлов на первом уровне'
For J = intU To 1 Step -1 'нахождение недоминируемых узлов первого уровня'
For i = 1 To intU
If i <> J And MetCurStage(i) = 0 Then
If VStage(J) <= VStage(i) And gс(NPStage(J)) >= gс(NPStage(i)) Then
'отсечение узлов с меньшей полезностью и большим требуемым моментом начала
intN = intN - 1 'количество разветвляемых узлов первого уровня '
MetCurStage(J) = 1 'метка доминирования над текущей работой'
i = intU 'выход из цикла'
End If
End If
Next i
Next J

```

Рис. 11.16 Отбор недоминируемых узлов на первом уровне

```

For i = 1 To intN
V(i) = VStage(TreeStage(i))
'включение недоминируемых узлов первого уровня в полные массивы недоминируемых узлов'
Par(i) = ParStage(TreeStage(i)) 'родительские узлы
Comp(i) = CompStage(TreeStage(i)) 'моменты окончания работ
NP(i) = NPStage(TreeStage(i)) 'номера работ в узлах
Brig(i) = BrigStage(TreeStage(i)) 'ведущие виды работ
FComp(i) = Comp(i) 'фиктивная длительность
For J = 1 To NMach 'по всем бригадам
Mach(i, J) = MachStage(TreeStage(i), J)
PBrig(i, J) = Mach(i, J)
'заполняем массива загрузки в разветвляемых узлах первого уровня'
Next J
TreeStage(i) = i
'номера узлов полных массивов, соответствующих недоминируемым узлам первого уровня'
Next i

```

Рис. 11.17 Перенос параметров недоминируемых узлов первого уровня в дерево

```

m = 1 + Int(Exec / 7) 'количество недель в цепочке
ReDim HBrig(NMach, m) ' массив понедельной загрузки бригад по видам работ
k = TreeStage(int2) 'номер последнего узла '
Do Until k = 0
aJ(NP(k)) = 0 'метка ранее запланированной работы в узлах до корня цепочки'
m2 = 1 + Int(Comp(k) / 7) 'последняя неделя выполнения работы
m1 = 1 + Int((Comp(k) - Dur(NP(k)) * 1.4) / 7) ' первая неделя выполнения работы
If m1 < 1 Then 'предохранитель
m1 = 1
End If
For J = 1 To NMach 'по бригадам
If Mach(k, J) > 0 Then 'если работа бригады в узле цепочки запланирована
If Comp(k) > Cl(J) Then 'для последнего момента выполнения
Cl(J) = Comp(k)
' момент окончания последней работы , выполняемой бригадой в календарных днях
PMach(J) = NP(k) 'номер последней работы, выполняемой бригадой
End If
Mz(J) = Mz(J) + Mach(k, J) 'суммарная загрузка бригады в цепочке для текущего узла
For l = m1 To m2
HBrig(J, l) = HBrig(J, l) + Mach(k, J) / (m2 - m1 + 1)
' загрузка от узлов цепочки по неделям выполнения выполнения в нчас
Next l
End If
Next J
k = Par(k) 'переход по цепочке'
Loop

```

Рис. 11.18 Восстановление параметров цепочки в узле

```

Number(intY) = intNodes 'запоминание номера последнего узла предыдущего уровня в полных массивах
...
intN = N 'количество недоминируемых узлов на уровне'
intNodes = intNodes + N 'полное количество узлов во всем дереве'
'переназначение массивов'
ReDim Preserve V(intNodes)
ReDim Preserve Par(intNodes)
ReDim Preserve Comp(intNodes)
ReDim Preserve MP(intNodes)
ReDim Preserve Brig(intNodes)
ReDim Mach(intNodes, NMach)
ReDim FComp(intN) 'массив фиктивных длительностей ветвей оконченного этапа'
For i = 1 To Number(intY) 'по узлам предыдущего уровня
  For J = 1 To NMach 'по бригадам
    Mach(i, J) = FBrig(i, J) 'восстановление ранее определенной загрузки в узлах
  Next J
Next i
'включение недоминируемых узлов уровня в полные массивы недоминируемых узлов'
For i = 1 To intN
  V(Number(intY) + i) = VStage(TreeStage(i)) 'полезность работ
  Par(Number(intY) + i) = ParStage(TreeStage(i)) 'родительские узлы
  Comp(Number(intY) + i) = CompStage(TreeStage(i)) 'моменты окончания работ
  MP(Number(intY) + i) = MPStage(TreeStage(i)) 'номера работ в узлах
  Brig(Number(intY) + i) = BrigStage(TreeStage(i)) 'ведущие виды работ
  FComp(i) = Comp(i) 'фиктивная длительность
  For J = 1 To NMach 'по всем бригадам
    Mach(Number(intY) + i, J) = MachStage(TreeStage(i), J)
  'дополнительная запись загрузки в новых узлах
  Next J
  TreeStage(i) = Number(intY) + i 'массив номеров узлов полных массивов для рассчитанного уровня
Next i
ReDim FBrig(intNodes, NMach) 'очистка массива
For i = 1 To Number(intY) + intN ' по всем построенным узлам дерева
  For J = 1 To NMach ' по всем бригадам
    FBrig(i, J) = Mach(i, J) 'запоминание загрузки бригад в узлах
  Next J
Next i

```

Рис. 11.19 Запись параметров недоминируемых узлов в основные массивы дерева

## 11.6 Коррекция расписания

Из рис. 11.8 следует, что загрузка бригады 2 по виду работ 3 превышает 100%. Рассматривая перечень работ бригады 2 на первой неделе, можно предположить, что эта нагрузка будет существенно уменьшена, если выполнение последней работы 7 будет перенесено на следующую неделю.

В программе предусмотрена возможность моделирования таких переносов с помощью формы корректировки, показанной на рис. 11.20, и позволяющей корректировать выполнения пяти работ. Для корректировки данные листа 1 копируются на лист 2, после чего программа запускает с режимом «Корректировка».

В данном случае, для работы 7 в начале планирования полагалось, что она должна быть закончена на 9-ой календарный день, а продолжительность ее выполнения составляет 10 дней (рис. 11.1). Как видно из рис. 11.20, при корректировке был установлен момент завершения работ на день 18, а продолжительность выполнения не изменялась.

Корректировка

Номер работы 7	Момент завершения 18	Плановая продолжительность 10
Номер работы	Момент завершения	Плановая продолжительность
Номер работы	Момент завершения	Плановая продолжительность
Номер работы	Момент завершения	Плановая продолжительность
Номер работы	Момент завершения	Плановая продолжительность

Текущие параметры    Ввод данных в Excel    Запуск программы    Выход из программы

OK    OK    OK    OK

Рис. 11.20 Форма коррекции планового задания

После запуска продолжения программы диаграмма загрузки бригад несколько изменяется (рис. 11.21). Т.к. часть работы 7 переносится на следующую неделю, загрузка бригады 2 по виду работ 3 становится менее 100% (черный цвет).

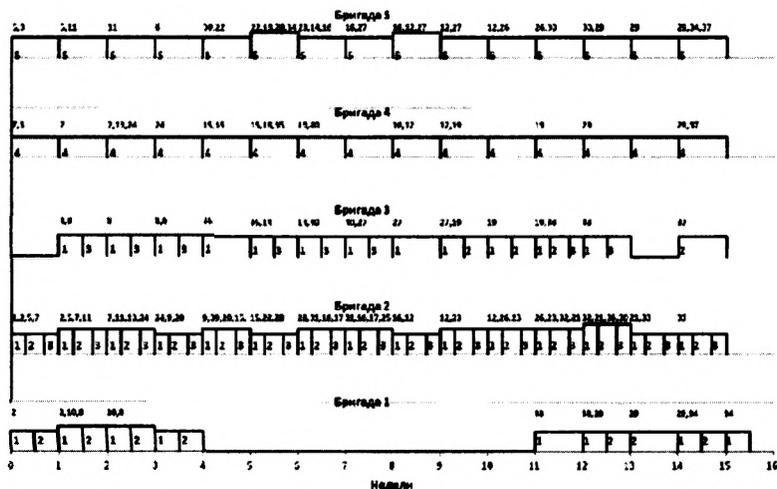


Рис. 11.21 Диаграмма загрузки после коррекции

# Заключение

Главной целью монографии является последовательное изложение метода функций полезности заказов для построения рациональных цеховых расписаний. Для этого в главе 3 был разработан соответствующий математический аппарат, который в дальнейшем был использован для решения целого ряда плановых задач. Эти задачи охватывают как позаказное планирование, так и планирование «на склад»; часть задач характерна для дискретного производства, другая часть – для процессного производства. Таким образом, предлагаемый расчетный метод может быть использован в самых различных производственных отраслях.

Несмотря на широкие возможности описываемого метода, результаты его применения существенно зависят от адекватности расчетной схемы задачи планирования и реальных условий функционирования цеха. Как отмечалось в предисловии, на каждом предприятии есть свои отличия, влияющие на составление расписаний. Качественное расписание может быть составлено только с учетом специфичности конкретного производственного подразделения, а возможно и совокупности нескольких подразделений. Поэтому практическое использование любой из описанных в книге программ, как правило, требует их определенную доработку.

При изложении программ автор последовательно придерживается стандартной классификации оптимизационных моделей планирования (1.1). На первом месте этой классификации находится тип производства (техническая структура производственного подразделения), причем обычно рассматриваются 5 возможных типов: одиночная машина, параллельные машины, поточное производство, универсальное производство и производство с не установленным порядком технологического процесса. Для каждого типа производства в книге рассмотрено несколько различных задач.

В рамках каждого типа производства каждая конкретная задача планирования описывается второй составляющей классификации: возможные ограничения по датам начала и окончания работ, возможность прерываний работ, последовательность операций, обработка партиями, требования по различным ресурсам, экологические и другие ограничения. Описанные выше программы планирования, разумеется, не могут охватить даже небольшой доли таких возможных задач, поэтому здесь сделана попытка проиллюстрировать возможности метода только на некоторых, как кажется автору, наиболее типичных задачах.

Как указывалось в главе 2, совокупность событий, происходящих в производственном подразделении за некоторый плановый период, обуславливает динамичность цехового планирования, причем большая часть этих событий имеют значительную случайную составляющую. Несмотря на это, в книге не рассматривается работа со случайными величинами. Автор исходит из представления о том, что после того, как случайное событие произошло, его учет вполне возможен при помощи детерминированных методов, приводящим к необходимым плановым изменениям. Поэтому каждая описанная программа включает механизм перепланирования.

Производство может эффективно функционировать только в том случае, если небольшие, но часто случающиеся, случайные изменения не вызывают резких изменений в существующих

планах, т.е. при устойчивом планировании. Предлагаемый метод функций полезности заказов является в этом отношении достаточно устойчивым, причем он вполне адекватно реагирует на случающиеся изменения, включая необходимость выполнения срочных работ.

Пересчет расписания, как упоминалось выше, в ряде случаев является довольно трудоемкой операцией. Причина состоит в том, что при проведении нового планирования необходимо учесть данные о состоянии работ и машин в момент ввода в действие нового плана. Вообще говоря, такие данные могут быть получены двумя способами: либо путем расчета предыдущего плана на момент составления нового расписания, либо по фактическому состоянию с рабочих мест. При практическом планировании целесообразно иметь специальную программу для расчета существующего плана на любой текущий момент, причем такую программу, очевидно, следует составлять при окончательной доработке плановой задачи. В то же время, при составлении расписания необходимо использовать все доступные фактические данные по оперативной цеховой обстановке.

Во всех рассмотренных задачах генерируемые расписания полностью учитывают календарный график работы цеха, включая режим работы каждой смены. Если работа может прерываться (например, в дискретном производстве), программа полностью использует имеющийся резерв суточного рабочего времени. Если график предусматривает нерабочие дни, или рабочий день меньше 24 часов, то в некоторых случаях (например, в процессном производстве) программа предварительно проверяет возможность окончания работы до наступления нерабочего времени. Если резерва времени недостаточно, работа автоматически переносится на следующий рабочий день.

Различные изменения в производственной ситуации приводят к меньшим экономическим потерям в случае применения гибкого производства. В книге, в основном, рассматривается производственная гибкость при выпуске различных модификаций продукции и чередовании выпуска различной продукции. Гибкость такого типа является следствием применения группового планирования, при котором группы образуются в соответствии с типом выполняемой работы. Как указывалось выше, применение технологического группирования работ обеспечивает небольшую трудоемкость перехода от одной работы к другой внутри группы.

Внутри группы последовательность работ не обязательно совпадает с порядком их номеров, поскольку работы в одной группе могут иметь различную трудоемкость. Если резерв времени выполнения всех работ в одной группе положительный, то система иногда рекомендует выполнять сначала работы с меньшей трудоемкостью с тем, чтобы понизить суммарную длительность производственного цикла. Наоборот, если часть работ в группе просрочена, система может рекомендовать вначале выполнить работу с большей трудоемкостью, чтобы понизить возможные штрафные функции за просрочку.

Группа работ может стать одной партией изготовления, если выполнение всех этих работ осуществляется одновременно на одной машине (печи, ванне). В этом случае все работы, включенные в группу, подвергаются обработке с одинаковыми режимами, и, соответственно, могут рассматриваться как работы одного вида. Группирование возможно не только при позаказном планировании, также при планировании «на склад», что характерно для процессного производства, изготовления метизов, крепежа, инструментов и т.д. Почти все описанные выше программы автоматически осуществляют групповое планирование, при этом обычно автоматически создается расписание, в котором коэффициенты группирования для наиболее загруженных машин заметно выше, чем для остальных машин.

В большинстве программ предусмотрена возможность моделирования расписания с целью выявления изменений процесса составления расписания и его результатов в зависимости от варьируемых параметров. Ограничители ветвления весьма существенно уменьшают количество не доминируемых ветвей построения дерева решений за счет отбрасывания «длинных» ветвей

с большой продолжительностью выполнения. Поэтому использование ограничителей позволяет уменьшить продолжительность выполнения программы. В то же время, слишком жесткие ограничения по длительности ветвей могут излишне уменьшить количество получаемых вариантов, исключив из этого количества ряд вполне целесообразных вариантов плана.

При моделировании горизонт планирования может изменяться. При увеличении горизонта, начиная с небольшой величины, показатели расписания обычно улучшаются за счет группирования работ, но затем, по достижении определенного значения, начинают ухудшаться. Такое значение здесь называется критическим.

Большая часть программ снабжена механизмом построения графических диаграмм, в том числе диаграмм Ганта. Из этой диаграммы наглядно видно, как происходит группирование, т.к. работы разных видов закрашиваются разными цветами. Диаграмма Ганта хорошо иллюстрирует влияние трудоемкости работ на последовательность их выполнения. Горизонтальный размер прямоугольника, описывающего каждую работу, соответствует длительности ее непосредственного выполнения. Практическое использование приведенных программ требует определенного навыка в работе. Прежде всего, необходима тщательная подготовка исходных данных для первоначального планирования. При анализе полученных результатов имеет смысл изучить различные варианты расчета при изменении весовых коэффициентов.

Следует иметь в виду, что увеличение весового коэффициента далеко не всегда приводит к более раннему выполнению соответствующей работы, т.к. этот коэффициент способствует ее выполнению именно в заданный срок. При необходимости более быстрого выполнения конкретной работы наиболее сильным средством является задание более ранней даты требуемого выполнения. В таком случае увеличение весового коэффициента также способствует скорейшему выполнению.

# Список литературы

1. Афоничкин А.И., Михайленко Д.Г. Управленческие решения в экономических системах. – СПб: Питер, 2009
2. Грачева К.А., Захарова М.К., Одинцова Л.А и др.; под редакцией Скворцова Ю.В., Некрасова Л.А. Организация и планирование машиностроительного производства. – М.: Высшая школа, 2005
3. Грубый С. В., Зайцев А. М. Оптимизация режимных параметров фрезерования карманов в корпусных деталях из алюминиевых сплавов // Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электронный журнал. 2015, № 07, с. 44–65
4. Канеман Д., Тверски А. Экономическая психология, рациональный выбор, ценности и фреймы // Психологический журнал, 2003, № 24, 4, с. 31–42
5. Мауэргауз Ю.Е. Информационные системы промышленного менеджмента. – М.: Филинь, 1999
6. Мауэргауз Ю.Е. «Продвинутое» планирование и расписания – М.: Экономика, 2012
7. Родов А. С., Крутянский Д.И. План, поток, ритм. – Ростов-на-Дону, Ростовское книжное издательство, 1964
8. Фролов Е. Б. Управление станочными системами: современные концепции управления в производственной логистике. Часть 3 // Станочный парк, 2010, № 6 (72), с. 41-43
9. Allahverdi, A., Ng, C.T., Cheng, T.C.E. and Kovalyov, M.Y. A survey of scheduling problems with setup times or costs // European Journal of Operational Research, 2008, Vol. 187, 985–1032 pp.
10. Blackburn, J. and Millen, R. Perspectives on Flexibility in Manufacturing: Hardware versus Software. In: Modeling and Design of Flexible Manufacturing Systems, Vol. 2, 116–117 pp., Amsterdam, Elsevier Science Publishers, 1986
11. Canon, L.-C. and Jeannot, E. MO-Greedy: an extended beam-search approach for solving a multi-criteria scheduling problem on heterogeneous machines, In: The IEEE International Symposium on Parallel and Distributed Processing Workshops and PhD Forum, Anchorage, Alaska, USA, 2011
12. Carlier J. The one machine sequencing problem // European Journal of Operational Research, 1982, Vol. 11, 42–47 pp.

13. Graham, R. L., Lawler, E. L., Lenstra, J. K. and Rinnoy Kan, A. H. Optimization and approximation in deterministic machine scheduling // *Annals of Discrete Mathematics*, 1979, Vol. 5, 287–326 pp.
14. Nyhuis, P., Wiendal, H.P. *Fundamentals of Production Logistics*. Berlin: Springer, 2009
15. Pinedo, M.L. *Scheduling – Theory, Algorithms, and Systems*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1995
16. Shnits B., Rubinovitz J. and Sinreich D. *Multicriteria Dynamic Scheduling Methodology for Controlling a Flexible Manufacturing System* // *International Journal of Production Research*, 2004, Vol. 42, No. 17, 3457-3472 pp.
17. Stadtler, H., Kilger, C. *Supply Chain Management and Advanced Planning. Concepts, Models, Software, and Case Studies-* Berlin: Springer, 4th ed., 2008
18. Sule D. R. *Production Planning and Industrial Scheduling*. London: Taylor and Francis Group, 2007

# Приложения

## Список условных обозначений

- $C_{max}$  – величина, равная отрезку времени от начала работ по разработанному плану до момента окончания последней работы, указанной в этом плане (makespan);
- $c$  – стоимость трудозатрат одной смены;
- $c_0$  – затраты на организацию заказа;
- $c_h$  – затраты на хранение единицы продукта;
- $c_p$  – стоимость продукта;
- $D$  – количество расходуемого продукта в единицу времени (спрос);
- $d$  – требуемый момент окончания работы в календарных днях или часах;
- $dd$  – требуемый момент окончания работы в рабочих днях или часах;
- $E$  – количество рабочих часов в рабочем дне.
- $\bar{F}$  – средняя длительность проведения работы из набора работ;
- $F_{max}$  – наибольшая длительность проведения работы из набора работ;
- $G$  – среднее количество рабочих часов или дней в плановом периоде;
- $H$  – производственная напряженность;
- $h$  – горизонт планирования;
- $p$  – трудоемкость работы;
- $Q$  – размер заказа (партии поставки);
- $r$  – ожидаемая дата поступления партии на обработку;
- $s$  – трудоемкость необходимой наладки оборудования;
- $T_{max}$  – наибольшее запаздывание работы из набора работ;
- $\bar{T}$  – среднее запаздывание работы из набора работ;
- $U$  – функция отрицательной полезности издержек (функция потерь);
- $V$  – функция текущей полезности заказов
- $\bar{V}$  – функция средней полезности заказов;
- $\bar{W}$  – средняя производственная загрузка;
- $w$  – весовой коэффициент работы;
- $Z$  – текущий запас продукта на складе;
- $Z_c$  – страховой запас;
- $\alpha$  – психологический коэффициент

# Планирование производства в информационной системе «1С:Предприятие 8. MES Оперативное управление производством»

## Общие положения

Программный продукт «1С:Предприятие 8. MES Оперативное управление производством» (далее – 1С:MES) предназначен для решения оперативных производственных задач, повышения эффективности управления и контроля процесса производства. Продукт относится к классу MES (Manufacturing Execution System) – систем управления производством уровня цеха и предназначен для решения задач синхронизации, координации, анализа и оптимизации выпуска продукции в рамках какого-либо производства.

1С:MES разработан на новейшей версии технологической платформы "1С:Предприятие 8.3 которая использует облачные технологии, позволяющие:

- обеспечить высокую надежность, производительность и масштабируемость системы, так как все основные вычисления реализуются в кластере серверов 1С Предприятия, а не на клиентских устройствах;
- организовать работу с системой через Интернет, в режиме тонкого клиента или веб-клиента (через обычный интернет-браузер), в том числе в "облачном" режиме;
- создавать мобильные рабочие места с использованием планшетов и смартфонов под управлением iOS, Android, Windows;
- использовать механизм разделения данных, благодаря которому прикладные решения могут работать в архитектуре multitenancy, когда единый экземпляр объекта приложения, запущенного на сервере, обслуживает множество клиентов или организаций;
- настраивать интерфейс для конкретного пользователя или группы пользователей с учетом роли пользователя, его прав доступа и индивидуальных настроек.

Для ознакомления с демо-версией 1С:MES можно воспользоваться демо сервисом 1С, оставив заявку на доступ к базе на сайте: [demo.solutions.1c.ru/portal/index.php?kod=MES](http://demo.solutions.1c.ru/portal/index.php?kod=MES).

---

Материал предоставлен компанией ООО «КТ-Сегмент» (Холдинг ЛЕНПОЛИГРАФМАШ), [www.kt-segment.ru](http://www.kt-segment.ru), тел. (812) 670-89-67)

## Описание возможностей программного продукта

IC:MES позволяет реализовать следующие типовые обобщенные функции MES-систем:

1. Контроль состояния и распределение ресурсов (RAS) – Управление ресурсами производства: технологическим оборудованием, материалами, персоналом, документацией, инструментами, методиками работ.
2. Диспетчеризация производства (DPU) – Управление потоком изготавливаемых деталей по операциям, заказам, партиям, сериям, посредством рабочих нарядов.
3. Сбор и хранение данных (DCA) – Взаимодействие информационных подсистем в целях получения, накопления и передачи технологических и управляющих данных, циркулирующих в производственной среде предприятия.
4. Управление качеством продукции (QM) – Анализ данных измерений качества продукции в режиме реального времени на основе информации поступающей с производственного уровня, обеспечение должного контроля качества, выявление критических точек и проблем, требующих особого внимания.
5. Управление производственными процессами (PM) – Мониторинг производственных процессов, автоматическая корректировка либо диалоговая поддержка решений оператора.
6. Отслеживание истории продукта (PTG) – Визуализация информации о месте и времени выполнения работ по каждому изделию. Информация может включать отчеты: об исполнителях, технологических маршрутах, комплектующих, материалах, партионных и серийных номерах, текущих условиях производства и т.п.
7. Анализ производительности (PA) – Предоставление подробных отчетов о реальных результатах производственных операций. Сравнение плановых и фактических показателей.

Система «IC:MES Оперативное управление производством» предназначена для решения задач оперативного планирования, диспетчеризации производственных процессов и проведения контроля качества.

Улучшение технико-экономических показателей производства при внедрении системы достигается за счет сокращения времени выполнения заказов путем рациональной загрузки оборудования, снижения объемов непроизводительного труда, уменьшения простоев и времени хранения полуфабрикатов.

Для решения задачи построения оптимального плана и расписания производства в IC:MES применяется математический аппарат теории расписаний, в частности эвристический алгоритм, сочетающий жадные стратегии и стратегии ограниченного перебора, элементы теории графов.

Алгоритм производственного планирования позволяет размещать технологические операции на оси времени рабочих центров без дискретных интервалов, с учетом следующих ограничений:

- Условия предшествования технологических операций;
- Доступность основных рабочих центров и оснастки.

## Описание работы с программой

Перед работой в Системе IC:MES необходимо убедиться, что заполнена вся необходимая нормативно-справочная информация:

- Номенклатура (справочник предназначен для описания готовой продукции, материалов, комплектующих, полуфабрикатов, используемых на предприятии);
- Спецификации (справочник содержит информацию о нормах потребления материалов, комплектующих для производства выходного изделия и плановых нормах отходов, получаемых в процессе обработки деталей);
- Технологические карты (вид нормативной информации, определяющий параметры выполнения обособленной группы технологических операций, в рамках указанной спецификации);
- Справочники структуры предприятия (Организации, Подразделения, Физические лица);
- Рабочие центры, с привязанными графиками работ;
- Справочники учета и нормирования (тарифные разряды, номера тарифной сетки).

Нормативно-справочная информация может быть внесена непосредственно в IC:MES, или быть выгружена из систем конструкторско-технологической подготовки (например, IC:PDM).

Для оформления в системе потребности к производству продукции/выполнению работ и управления исполнением этой потребности предназначен документ «Заказ на производство».

При заполнении заказа указываются директивные сроки исполнения заказа и предпочитаемое направление планирования – прямое (как можно быстрее) или обратное (точно к сроку).

При добавлении новой позиции в заказ программа автоматически подбирает спецификацию изделия, установленную в качестве основной.

Перед запуском в производство осуществляется формирование электронной структуры заказа. Имеется возможность внесения ручных корректировок для потребностей, спецификаций и технологических карт.

Разулованная структура включает в себя только номенклатурные позиции с видом воспроизводства Производство.

Для обеспечения непрерывности цикла производственного процесса в производстве могут использоваться производственные заделы (ранее произведенные полуфабрикаты). В Структуре заказа есть возможность подобрать производственные заделы под заказ автоматически и вручную. Заделы подбираются исходя из следующих правил:

- В качестве заделов подбираются только свободные полуфабрикаты (не зарезервированные под маршрутные карты), находящиеся в цеховой кладовой.
- Заделы подбираются исходя из приоритетов заказов (самый приоритетный обеспечивается первым).

У номенклатуры, для которой подобрался задел, в строке установится флаг.

Рис. 1 Документ «Заказ на производство»

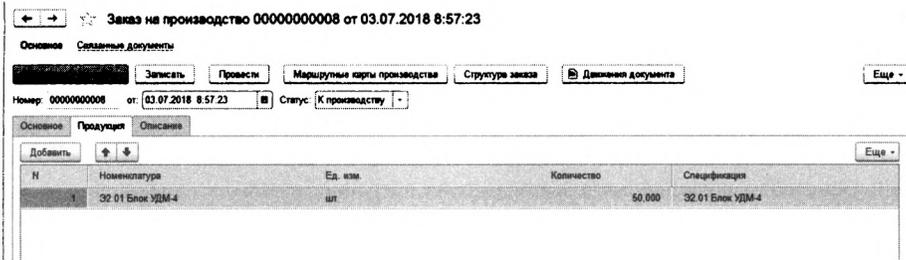


Рис. 2 Добавление новой позиции в заказ

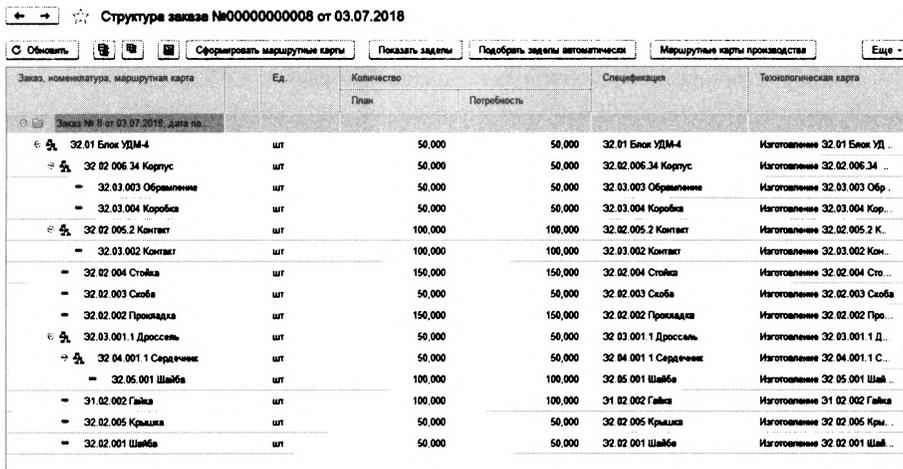


Рис. 3 Электронная структура заказа

В структуре заказа указывается количество подобранного задела (уменьшается количество потребности в номенклатуре).

После построения электронной структуры заказа формируются маршрутные карты производства. Маршрутная карта составляется на деталь/сборку/изделие и содержит в себе описание технологического процесса изготовления по всем операциям в технологической последовательности с указанием соответствующих данных по оборудованию, материальным и другим нормативам.

В системе «IC:MES» реализовано два уровня управления планированием – расчет графика производства в разрезе маршрутных карт для всего производства в целом (для оценки исполнимости заказов в указанным директивным сроком, работа с приоритетами заказов) и внутрицеховое производственное планирование с учетом моделей планирования.

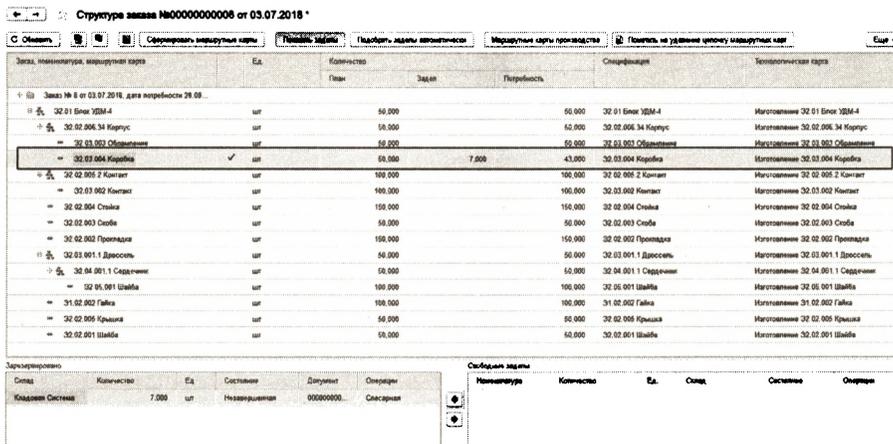


Рис. 4 Флаг номенклатуры с подобранным заделом

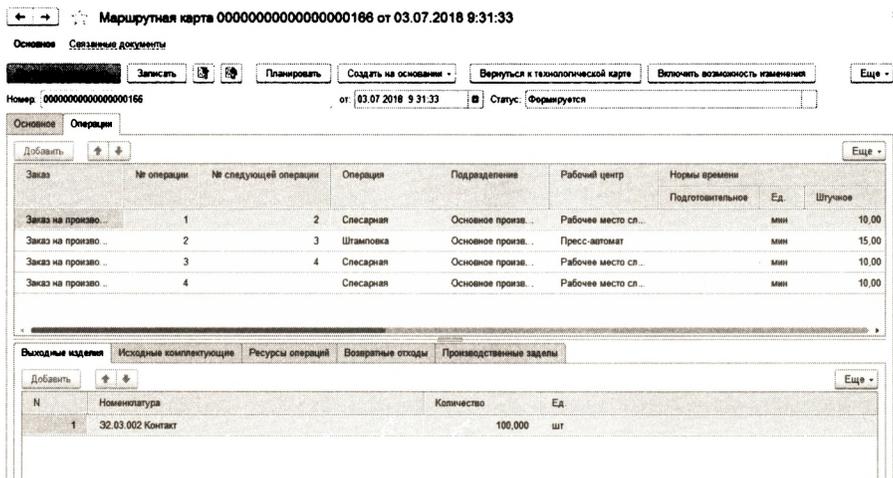


Рис. 5 Маршрутная карта производства

## Расчет графика производства

График производства позволяет оценить исполнимость полученных заказов на производство к дате потребности, обновить построенный график, при внесении изменений и отклонениях в производственных планах.

График производства отражает совокупность маршрутных карт производства, расставленных по времени планируемого исполнения. Расчет графика выполняется по интервалам планирования с уменьшением доступности загружаемых рабочих центров. По результатам расчета

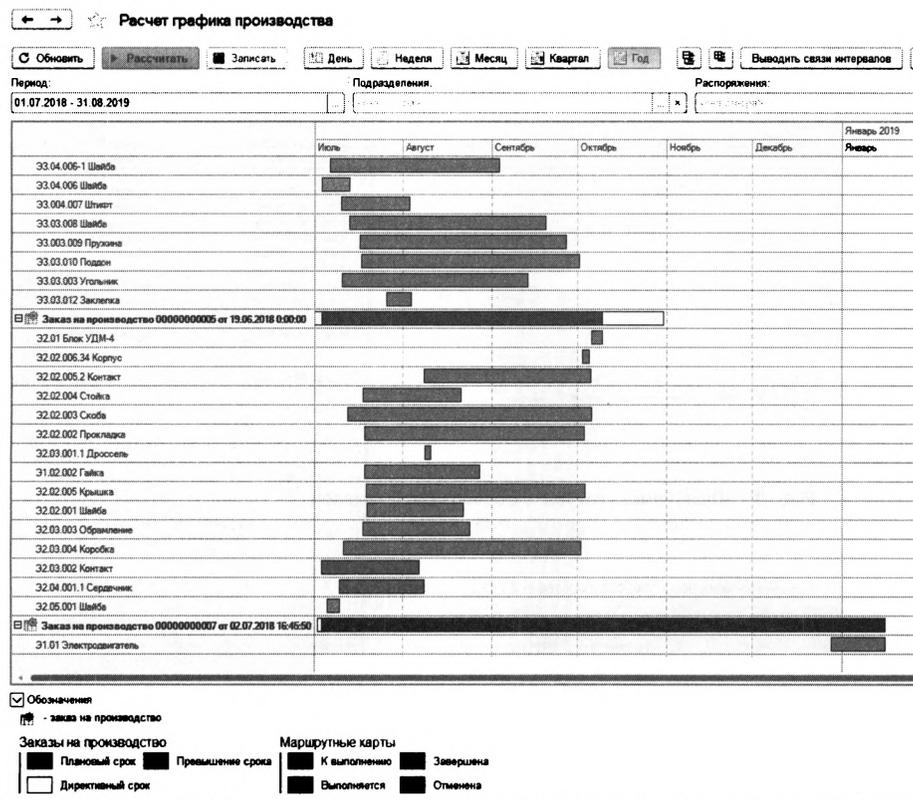


Рис. 6 Форма расчета графика производства

формируется график производства и в маршрутные карты записывается предварительная дата запуска/выпуска.

## Планирование расписания производства

На уровень MES-планирования передается график производства (Главный план) – объем работ на интервал планирования, для исполнения которого в заданном интервале хватает доступности групп рабочих центров. В рамках интервала MES планирует конкретное время выполнения для каждой операции, с определением конкретных рабочих центров, которые будут работать над выполнением операций.

В основе механизма планирования заложена концепция MRP II (Manufacturing Resource Planning – Планирование производственных ресурсов). Данная концепция задаёт принципы детального планирования производства предприятия, включающие учёт заказов, планирование загрузки производственных мощностей (оборудования), моделирование хода производства, его учёт, планирование выпуска готовых изделий, оперативное корректирование плана и производственных заданий.

Маршрутная карта 0000000000000000080 от 19.06.2018 9:31:45

Основное Сведения документа

Провести и закрыть Записать Планировать Создать на основании Вернуться к технологической карте Включить возможность изменения

Номер 0000000000000000080 от 19.06.2018 9:31:45 Статус: К выполнению

Основное Операции

Расписание: Заказ на производство 0000000004 от 19.06.2018 0.00.00

Наименование: Изготовление 33 03 012 Записка №1

Подразделение: Основное производство

Спецификация: 33 03 012 Записка

Тех карта: Изготовление 33 03 012 Записка

Комментарий:

Производство: с 26.07.2018 по 03.08.2018

Рассчитывать очередь: по общей длительности

по доступности РЦ

планировать не ранее

Рис. 7 Маршрутная карта с предварительной датой запуска/выпуска

Все операции маршрутных карт, переданные на уровень MES, планируются прямым планированием, с учетом сроков выполнения МК, полученных после расчета графика. На уровне MES-планирования могут использоваться несколько моделей планирования в соответствии с выбранными критериями оптимизации.

При запуске пооперационного планирования указываются следующие параметры:

- Момент планирования – определяет момент времени, начиная с которого будет выполняться размещение тех. операций в расписании производства.
- Горизонт планирования – определяет интервал времени, на котором будут размещаться операции, начиная от момента планирования.
- Подразделение – подразделение, расписание которого необходимо рассчитать.
- Модели планирования – модели планирования, в соответствии с которыми будет выполнен расчет расписания.

Для каждой модели планирования в процессе расчета будет построен отдельный вариант расписания. Модели планирования можно создать, используя критерии оптимизации.

**Параметры расчета**

▶ Рассчитать расписание производства продукции... Еще - ?

**Сроки**

Момент планирования: Текущее время Произвольная дата 03.07.2018 10:35:25

Горизонт планирования: 10 дн.

**Настройки**

Подразделение: ООО "Производственная организация" + ⊞

Модели планирования: КПо - возможность ... ×

**Отбор**

Распоряжения: с 0000 отбор ... ×

Маршрутные карты: с 0000 отбор ... ×

Рис. 8 Параметры расчета

## Критерии оптимизации в моделях планирования

В группе «Критерии оптимизации» определяется значимость (весовая оценка) двух сводных критериев оптимизации: минимизировать срок выпуска и минимизировать стоимость расписания. Критерии оптимизации оказывают влияние на модель согласно своему весу. Вес критерия – процентное соотношение важности влияния данного критерия на результат планирования – расписание производства (сумма весов всех критериев = 1).

**Минимизация сроков (равномерная загрузка) (Модель планирования)**

Записать Еще ▾

Наименование:

**Критерии оптимизации**

Минимизировать срок выпуска  Минимизировать стоимость расписания

Текущая оценка: учитывается единственный критерий - сокращение срока выпуска.

Способ загрузки:  ▾

Максимизировать загрузку единицы оборудования

Загружать оборудование равномерно

**Рис. 9** Критерии оптимизации

Способ загрузки определяет принцип загрузки взаимозаменяемых рабочих центров:

1. Максимизировать загрузку единицы оборудования определяет, что при расчете расписания система будет стремиться загрузить минимальное количество рабочих центров данного вида, тем самым максимизируя загрузку отдельно взятой единицы оборудования;
2. Загружать оборудование равномерно определяет, что при расчете расписания система будет стремиться загрузить максимальное количество рабочих центров данного вида, обеспечив тем самым равномерную загрузку всего парка оборудования

В результате MES-планирования операциям назначаются конкретные рабочие центры и время выполнения операции.

В случаях отклонение от расписания производства (возникновения брака, поломки оборудования, отставания/опережения от плановых показателей времени выполнения операций и др.), для актуализации данных необходимо осуществить перепланирование расписания производства.

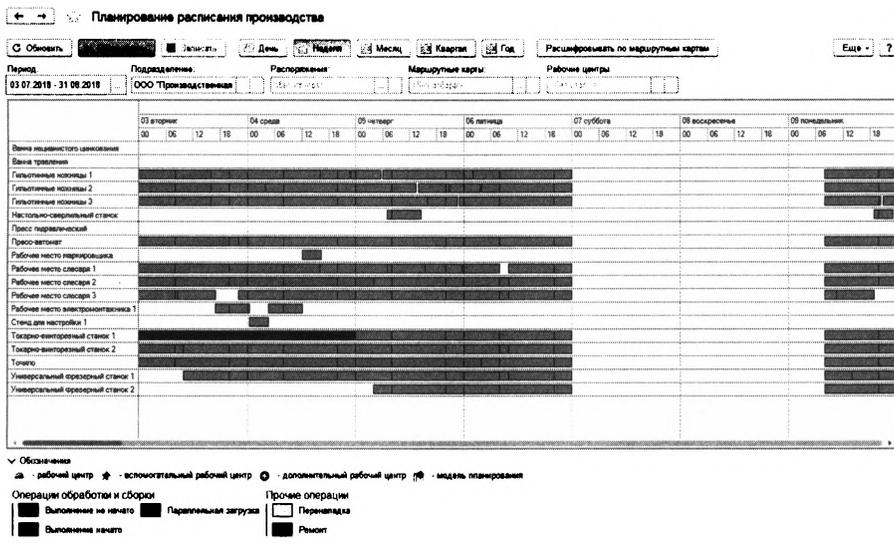


Рис. 10 Пример расчета

## Диспетчеризация по запланированным заказам

Система 1С:MES предоставляет возможность обеспечивать контроль за протеканием производственного процесса, вплоть до каждой технологической операции, с целью его оперативной корректировки, для достижения заданных планов значений параметров выпуска готовой продукции.

Подсистема решает задачи: управления производственными операциями, проведения контроля качества, формирования производственных заданий и оформления документов выпуска.

Основными задачами подсистемы диспетчеризации производства являются:

- Управление производственными операциями;
- Формирование заданий на исполнение производственных операций;
- Оперативное отражение хода исполнения операций;
- Работа с промышленными терминалами;
- Проведение контроля качества;
- Формирование документов выпуска;
- Учет незавершенного производства.

## Дополнительные преимущества системы

- Специалистам планово-экономического отдела – рассчитывать график производства продукции, контролировать сроки исполнения плана, контролировать объемы сдельной заработной платы рабочих;
- Специалистам производственно-диспетчерского отдела – формировать маршруты производства, планировать расписание производства осуществлять оперативный контроль про-

изводства, контролировать сроки выполнения технологических операций и сдачи готовых изделий;

- Специалистам отдела материально-технического обеспечения – получать графики потребности в материалах и полуфабрикатах и сведения, необходимые для отпуска материалов в производство;
- Специалистам отдела технического контроля – учитывать брак в ходе изготовления изделий, контролировать показатели качества и их изменение на всех этапах производства;
- Менеджерам по продажам – получать актуальную информацию об исполнимости заказа в заданные покупателем сроки;
- Начальникам производств – получать информацию о запланированных операциях, назначать исполнителей, контролировать исполнение технологических операций;
- Рабочим – оперативно получать план работ на смену, отражать исполнение операций;
- Кладовщикам – вести учет незавершенного производства.

Ю.Е. Мауэргауз. Динамические расписания для гибких производств. 12 компьютерных программ / Мауэргауз Ю.Е., М.:НГСС–2018. 312 стр. с илл.

Подписано в печать 20.07.2018 г., формат 70×100/16, гарнитура Таймс, печать офсетная, тираж 500 экз. Заказ № ВЗК-03093-18.

Отпечатано с готовых файлов заказчика в АО «Первая Образцовая типография», филиал «Дом печати – ВЯТКА», 610033, г. Киров, ул. Московская, 122.

© Ю.Е. Мауэргауз, 2018

**ISBN 978-5-9906448-1-6**