

УДК 658.011.56

М. С. Куняев, А. С. Фирсов,
Е. Н. Хоботов

ВЫБОР ПОДХОДА К ПОСТРОЕНИЮ СИСТЕМЫ ПЛАНИРОВАНИЯ РАБОТ НА МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОМ ПРЕДПРИЯТИИ

Рассмотрены задачи построения системы планирования работ на уровне предприятия, в состав которого входит несколько цехов, в том числе цех сборки. Для их решения предложены методы агрегирования и построения крупных планов работ для групп деталей. При необходимости такие планы работ могут быть детализованы до расписания обработки отдельных деталей.

**E-mail: e_khobotov@mail.ru; kuniaev@bk.ru;
tocsafigo@yandex.ru**

Ключевые слова: *методы планирования, теория расписаний, методы оптимизации, линейное программирование, диспетчеризация, методы моделирования.*

В настоящее время разработка методов решения задач планирования на предприятиях представляется весьма важной и актуальной, поскольку правильно построенные планы и расписания обработки деталей во многих случаях позволяют значительно сократить сроки выполнения работ за счет сокращения простоев оборудования. Для решения задач планирования и построения расписаний работ на уровне производственного цеха или участка уже разработано достаточно много методов [1–6].

Однако применение этих методов и созданных на их основе систем для построения даже оптимальных планов и расписаний работ в отдельных цехах и участках может не обеспечить построения “хороших” планов работы предприятия по выпуску готовой продукции. Подтверждающий это пример приведен далее. Использование же методов планирования работ на уровне цехов для построения планов работ на уровне предприятия вызывает значительные затруднения из-за весьма большой размерности возникающих задач.

Поэтому для решения задач планирования и построения расписания работ на уровне предприятия необходима разработка принципиально новых методов и математических моделей.

В настоящей работе рассмотрен один из подходов к разработке методов и моделей, которые позволят строить согласованные планы

работ для различных подразделений предприятия. Построенные планы в случае необходимости могут быть детализированы до расписания обработки каждой детали на каждом рабочем месте. Также рассматривается структура системы управления предприятием, в которой может быть реализовано построение таких планов.

Системы планирования работ. В настоящее время для планирования работ на машиностроительных предприятиях используются системы ERP и MES [7–9].

В системах планирования ресурсов предприятия (ERP — Enterprise Resource Planning System) достаточно хорошо реализованы функции учета и построения различных отчетов, но модели и методы планирования в них реализованы слабо или вовсе не реализованы. Как правило, в системах данного класса формируется портфель заказов, на основе которого составляется объемный план производства и проверяется его выполнимость по фондам времени оборудования и финансовых возможностей предприятия по обеспечению производства необходимыми ресурсами.

К программным продуктам, призванным решать задачи планирования работ на предприятии, относятся системы оперативного управления (MES — Manufacturing Execution System). Системы этого класса решают задачи оперативно-календарного планирования, диспетчеризации, построения расписания работ, подготовки сменно-суточных заданий, составление отчетов и т.д.

В результате анализа ныне существующих MES-систем российских и иностранных производителей [10] было выявлено, что многие системы слабо реализуют методы оперативного планирования и диспетчеризации. В основном системы данного класса хорошо решают задачи учета, сбора, хранения и предоставления пользователям требуемой информации, а также управления документооборотом.

Однако построение даже оптимальных расписаний работ для отдельных цехов, которые могут быть получены в результате работы MES-систем, может не гарантировать хорошего расписания работ для предприятия в целом. Следующий пример демонстрирует это свойство данных задач.

Пусть производство состоит из двух участков. На одном участке обрабатываются комплектующие детали, а на втором — из них собирается готовая продукция, состоящая из изделий двух типов. Сборка изделия может начаться только после изготовления всех комплектующих деталей для этого изделия. Каждое изделие состоит из трех деталей, которые в одной последовательности обрабатываются на двух станках, входящих в состав участка. Такая конфигурация участка и технология обработки, когда детали обрабатываются в одной последовательности

на двух станках, позволяет строить оптимальные расписания обработки деталей, поскольку условия обработки в этом случае соответствуют условиям задачи Джонсона [4]. Времена обработки всех деталей и сборки из них изделий приведены в таблице.

№ изделия	№ детали	Время обработки детали, мин		Время сборки изделия, мин
		на станке 1	на станке 2	
1	1,1	20	20	10
	1,2	5	15	
	1,3	15	5	
2	2,1	10	15	35
	2,2	30	10	
	2,3	10	20	

Рассмотрим различные варианты порядка обработки деталей и сборки изделий в условиях данной задачи.

Пусть порядок обработки деталей для всех изделий определен по теореме Джонсона и является оптимальным, а сборка изделий начинается сразу по мере завершения обработки всех комплектующих для одного из изделий. Из диаграммы Гантта, представленной на рис. 1 для этого случая, видно, что общее время обработки деталей составляет 95 мин и является минимальным, а общее время изготовления изделий в этом случае составляет 130 мин.

Рассмотрим другой порядок обработки, когда сначала обрабатываются комплектующие детали второго изделия, а затем первого изделия. Обработка комплектующих деталей для каждого изделия проводится по порядку, определяемому в соответствии с условиями оптимальности Джонсона. Сборка изделий начинается сразу же по мере завершения обработки всех комплектующих для собираемого изделия. Из диаграммы Гантта, представленной на рис. 2 для этого случая, следует, что время обработки деталей увеличилось и составляет 100 мин, но общее время изготовления изделий уменьшилось до 110 мин.

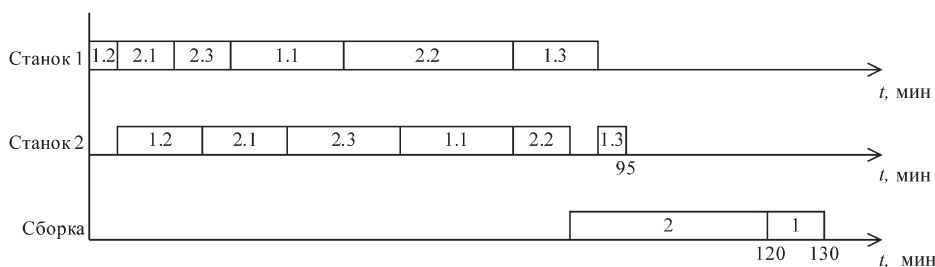


Рис. 1. Диаграмма Гантта при оптимальной последовательности обработки комплектующих деталей

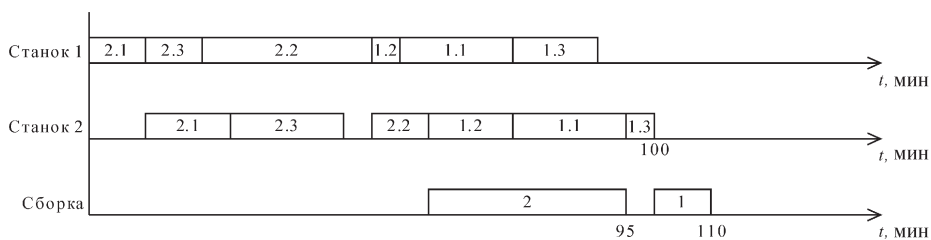


Рис. 2. Диаграмма Гантта при оптимальной последовательности сборки изделий

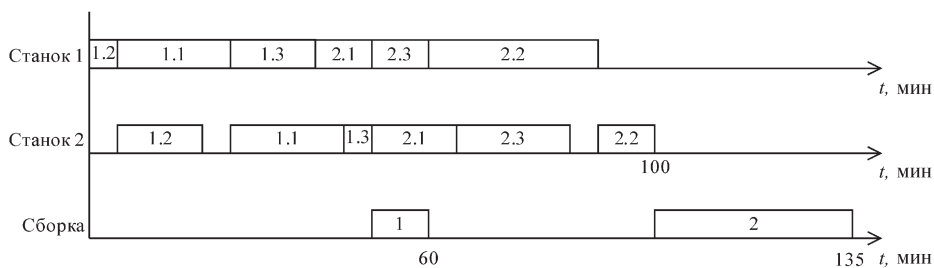


Рис. 3. Диаграмма Гантта сборки изделий в случае обработки комплектующих деталей первого изделия, а затем — второго

Еще один порядок обработки возникает, когда сначала обрабатываются комплектующие детали первого изделия, а затем второго изделия. Обработка комплектующих деталей для каждого изделия проводится по порядку, определяемому в соответствии с условиями оптимальности Джонсона. Сборка изделий начинается сразу же по мере завершения обработки всех комплектующих для собираемого изделия. Из диаграммы Гантта, представленной на рис. 3 для этого случая, видно, что время обработки деталей осталось равным 100 мин, но общее время изготовления изделий увеличилось до 135 мин и стало больше чем в двух предыдущих случаях.

Рассмотрим случай, когда сначала обрабатываются комплектующие детали второго, а затем первого изделия. Однако обработка комплектующих деталей для каждого изделия проводится не по оптимальному порядку, определяемому в соответствии с условиями оптимальности Джонсона, а по произвольному. Сборка изделий начинается сразу же по мере завершения обработки всех комплектующих для собираемого изделия. Из диаграммы Гантта, представленной на рис. 4, видно, что общее время обработки деталей увеличилось и составляет 110 мин. Общее же время изготовления изделий составляет 120 мин, что оказалось меньше общего времени изготовления изделий, полученного при оптимальном порядке обработки деталей для каждого изделия, но при другом порядке сборки изделий (см. рис. 3).

Поэтому для получения планов работ, позволяющих сокращать общее время изготовления изделий, необходимо осуществлять планиро-

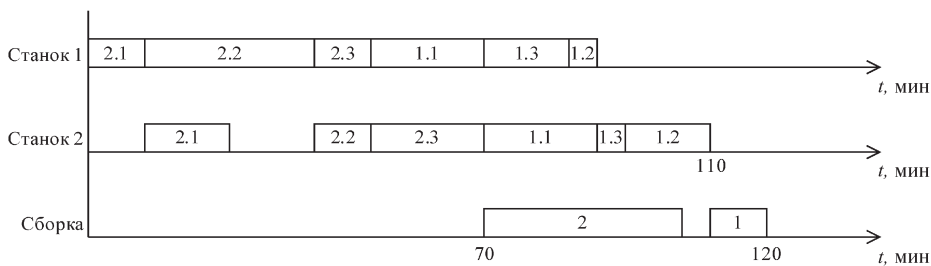


Рис. 4. Диаграмма Гантта при оптимальной последовательности сборки изделий, но произвольном порядке обработки деталей

вание и построение расписания работ как с учетом времени обработки комплектующих деталей, так и с учетом сборки из них готовых изделий.

Для получения приемлемого времени обработки комплектующих деталей необходимо строить согласованные планы работ для тех обрабатывающих подразделений предприятия, где обрабатываются комплектующие детали.

Однако использование традиционных методов для построения расписаний обработки даже не особенно большого с практической точки зрения числа комплектующих деталей на большом числе единиц оборудования уже вызывает значительные затруднения, а в большинстве реальных ситуаций оказывается невозможным. Поэтому для этих целей необходимо использование специальных методов.

Рассмотрим принципы построения расписаний с использованием таких методов.

Принципы построения расписаний работ на уровне предприятия. Для построения планов работ обрабатывающих подразделений предприятия в статье [11] предлагалось формировать укрупненные или каркасные расписания обработки групп деталей каждого изделия и уже наиболее выгодное каркасное расписание, если необходимо, детализировать до расписаний обработки отдельных деталей.

Каркасные расписания процессов обработки комплектующих деталей и сборки из них готовой продукции строятся на основе информации о времени обработки комплектующих деталей на каждом используемом оборудовании, порядке их обработки и времени сборки готовых изделий. При построении каркасных расписаний для определения времени обработки комплектующих деталей какого-либо изделия комплектующие детали этого изделия разбиваются на группы. Разбиение осуществляется таким образом, чтобы все детали одной группы при своей обработке в одной последовательности проходили бы одни и те же производственные системы и участки предприятия.

После формирования таких групп определяется время обработки деталей каждой группы на тех производственных участках предприя-

тия, где соответствующая группа деталей обрабатывается. Определение времени обработки группы деталей на производственном участке предприятия может проводиться как путем построения расписания обработки с помощью традиционных методов построения расписаний [3–6], так и с использованием моделей [11–14], позволяющих получать достаточно хорошие оценки этого времени.

После определения времени обработки всех сформированных групп деталей на производственных участках, где эти группы обрабатываются, строится каркасное расписание обработки, при этом каждая из сформированных групп деталей рассматривается, как обобщенная деталь, а производственный участок, на котором обрабатывают детали этой группы, рассматривается, как обобщенный станок. Временем обработки обобщенной детали на обобщенном станке считается время обработки соответствующей группы деталей на производственном участке, соответствующем этому обобщенному станку. Последовательность обработки таких обобщенных деталей на обобщенных станках определяется последовательностью обработки соответствующих групп деталей на производственных участках предприятия.

В связи с этим для построения и представления каркасных расписаний обработки групп деталей можно использовать традиционные методы построения и представления расписаний обработки деталей. Пример графического представления каркасного расписания с помощью диаграммы Гантта показан на рис. 5. Наборы прямоугольников, расположенных вдоль осей, соответствующих обрабатываемым системам и участкам, показывают последовательность, длительность и время начала и окончания обработки каждой группы деталей на производственных системах и участках предприятия. Время окончания обработки последней группы комплектующих деталей некоторого изделия и является временем изготовления комплектующих деталей для этого изделия.

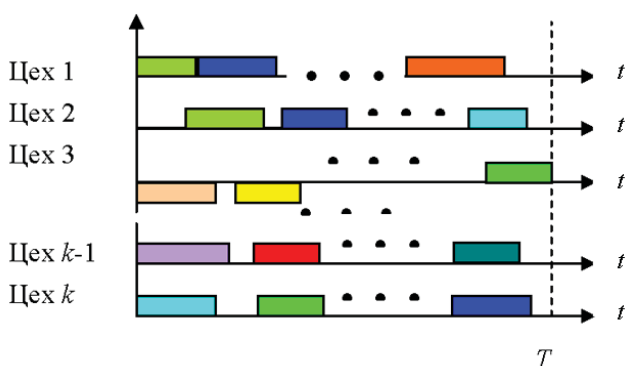


Рис. 5. Диаграмма Гантта для примера каркасного расписания

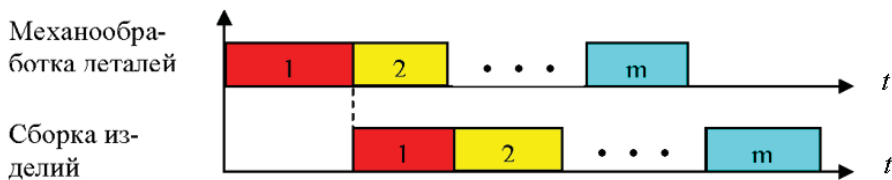


Рис. 6. Диаграмма Гантта для примера каркасного расписания изготовления изделий

Процессы обработки комплектующих деталей и сборки из них изделий, т.е. готовой продукции, можно рассматривать как некоторый аналог задачи Джонсона, если производственные системы и участки, на которых проводится обработка комплектующих деталей, рассматривать как первый станок, а сборочный участок — как второй. Такое представление процессов изготовления готовой продукции позволяет использовать условия оптимальности Джонсона [2–4] для определения последовательности сборки готовых изделий по информации о временах обработки комплектующих деталей и сборки из них готовых изделий.

Каркасное расписание обработки деталей и сборки из них готовых изделий может быть представлено графически с помощью диаграммы Гантта. Пример такого каркасного расписания показан на рис. 6. Наборы прямоугольников, расположенных вдоль оси, соответствующей механической обработке комплектующих деталей изделий, показывают последовательность, длительность и время начала и окончания обработки комплектующих деталей на производственных системах и участках предприятия. Наборы прямоугольников, расположенных вдоль оси, соответствующей сборке изделий, показывают последовательность, длительность и время начала и окончания сборки соответствующих изделий.

Определение времени обработки группы деталей на производственном участке предприятия, как уже отмечалось ранее, может проводиться как путем построения расписания обработки деталей этой группы на оборудовании участка с помощью традиционных методов построения расписаний, так и с использованием моделей, позволяющих получать подобные оценки.

Одной из моделей, позволяющих получать достаточно хорошие оценки времени обработки деталей i -го изделия на каком-либо производственном участке, является модель [12–15], расчеты которой сводятся к решению следующей задачи смешанного линейного программирования [8]:

$$\tilde{J}_i = \min \left\{ \alpha_1 T_i + \alpha_2 \sum_{r=1}^{R_v} \sum_{j \in I_{ir}} \sum_{l=1}^{m_{vr}} \tilde{\theta}_{ijl}^r c_{ijr} \right\} \quad (1)$$

при наличии ограничений

$$\sum_{j \in I_{ir}} \{ \theta_{ijl}^r \tilde{N}_{ij} t_{ijr} + \tilde{\theta}_{ijl}^r \tau_{ijr} \} \leq \mu T_i, \quad r = 1, \dots, R, \quad l = 1, \dots, m_r, \quad (2)$$

$$\sum_{l=1}^{m_{vr}} \theta_{ijl}^r = 1, \quad r = 1, \dots, R, \quad j \in I_{ir}, \quad (3)$$

$$\tilde{\theta}_{ijl}^r - \theta_{ijl}^r \geq 0, \quad r = 1, \dots, R, \quad l = 1, \dots, m_r, \quad j = 1, \dots, N_i, \quad (4)$$

где α_1 и α_2 — весовые коэффициенты; T_i — оценка времени обработки деталей для i -го изделия на производственном участке; θ_{ijl}^r — переменные ($0 \leq \theta_{ijl}^r \leq 1$); $\tilde{\theta}_{ijl}^r$ — целочисленные переменные, принадлежащие множеству $\{0, 1\}$; I_{ir} — множество деталей i -го изделия, которые обрабатываются на оборудовании r -го типа; c_{ijr} — стоимость переналадки оборудования r -го типа для обработки на нем деталей j -го типа для i -го изделия; \tilde{N}_{ij} — размер партии деталей j -го типа для i -го изделия; t_{ijr} — время обработки детали j -го типа для i -го изделия на оборудовании r -го типа; τ_{ijr} — время переналадки оборудования r -го типа для обработки на нем деталей j -го типа для i -го изделия; R — число типов оборудования на производственном участке; μ — средний коэффициент загрузки оборудования на производственном участке. Величина $\tilde{\theta}_{ijl}^r$ равна единице, если хотя бы одна деталь j -го типа для i -го изделия обрабатывается на l -м оборудовании r -го типа и нулю — в противном случае. При решении этой задачи помимо оценки времени изготовления группы деталей на участке (T_i) определяются величины $\theta_{ijl}^r \tilde{N}_{ij}$, показывающие, какую часть деталей партии изготавливать на l -м оборудовании r -го типа в случае, если имеется более одного станка r -го типа.

Если на производственном участке имеются станки только различных типов, т.е. все m_r равны единице, то все переменные θ_{ijl}^r и $\tilde{\theta}_{ijl}^r$ будут равны единице и решение этой задачи сводится к вычислению сумм:

$$\sum_{j \in I_{ir}} \{ \tilde{N}_{ij} t_{ijr} + \tau_{ijr} \} = \mu \tilde{T}_{ir}, \quad r = 1, \dots, R, \quad (5)$$

и выбору из \tilde{T}_{ir} максимальной величины, т.е. $T_i = \max_r \{ \tilde{T}_{ir} \}$; в этом случае за время обработки группы деталей принимается время выполнения всех операций на самом загруженном станке с поправкой на максимально допустимый коэффициент загрузки μ .

В тех же случаях, когда число деталей, входящих в некоторое изделие является достаточно большим, а на производственном участке имеется одна или несколько групп станков одного типа, размерность задачи (1)–(4) может оказаться весьма значительной. Для сокращения

размерности в таких случаях может быть использована другая оценка времени обработки деталей для i -го изделия на участке, которая получается из решения следующей частично целочисленной задачи линейного программирования [11, 13, 14].

$$\tilde{J}_i = \min\{T_i\} \quad (6)$$

при наличии ограничений

$$\sum_{j \in I_{il}} \{\tilde{N}_{ij}t_{ijr} + m_r\tau_{ijr}\} \leq \mu m_r T_i, \quad r = 1, \dots, R. \quad (7)$$

Здесь использованы те же обозначения, что и в соотношениях (1)–(4). Однако в этом случае из решения данной задачи получить распределение деталей по станкам не удастся, что весьма затрудняет построение расписания обработки деталей.

Решение задачи (6), (7) по существу также сводится к вычислению сумм

$$\sum_{j \in I_{il}} \{\tilde{N}_{ij}t_{ijr} + m_r\tau_{ijr}\} = \mu_r m_r \tilde{T}_{ir}, \quad r = 1, \dots, R,$$

и выбору из \tilde{T}_{ir} максимального значения, т.е. $T_i = \max_r \{\tilde{T}_{ir}\}$. Это значительно упрощает расчеты.

Построение каркасных расписаний обычно не вызывает больших затруднений, поскольку время обработки всех групп деталей на участках предприятия известно, последовательность обработки каждой группы деталей на участках предприятия определена еще на этапе формирования групп деталей.

Для построения каркасных расписаний, как уже отмечалось ранее, могут использоваться традиционные методы построения расписаний. При этом группы деталей рассматриваются как обобщенные детали, а производственные цеха и участки предприятия — как обобщенные станки.

Вообще выбор способа определения времени, необходимого для обработки той или иной группы деталей на производственных участках предприятия, зависит от конкретных условий, т.е. от числа деталей в группе, времени обработки деталей и числа единиц оборудования на участке, наличия требуемого программного обеспечения, а также требуемой точности решения.

Непосредственное построение расписаний обработки комплектующих деталей обычно позволяет с необходимой точностью определять это время. Однако использование традиционных методов для построения расписаний обработки при большом числе комплектующих деталей и при значительном числе производственных участков может вызывать значительные затруднения.

Для определения времени обработки комплектующих деталей в таких случаях также могут использоваться каркасные расписания.

Структура системы планирования работ для предприятия. Для формирования описанных каркасных расписаний обработки комплектующих деталей и сборки из них готовой продукции предлагается использовать систему планирования, структура которой представлена на рис. 7.

Для построения каркасных расписаний используется модуль планирования подсистемы планирования на уровне завода, а также модули планирования цехового уровня.

Группы деталей или каркасы для последующего построения каркасного расписания формируются с помощью модуля формирования групп деталей в подсистеме планирования предприятия. К одной группе деталей относят те комплектующие детали одного изделия, которые имеют одинаковый маршрут прохождения производственных участков предприятия.



Рис. 7. Структура системы планирования и диспетчеризации работ

Для формирования этого расписания необходимо получить оценки времени обработки каркасов на каждом участке (T_i^v). Такие оценки определяются с использованием подсистем планирования соответствующих цехов и участков. Полученные оценки передаются в подсистему планирования предприятия, в которой строятся каркасные расписания обработки комплектующих деталей, а также формируется в соответствии с условиями оптимальности Джонсона последовательность сборки готовой продукции.

Использование для построения каркасных расписаний подсистемы планирования предприятия и подсистем планирования цехов позволяет провести распараллеливание вычислений и тем самым сократить время построения планов.

После получения подходящего каркасного расписания работы предприятия формируются расписания обработки в группах деталей или в каркасах для каждого производственного участка. Кроме того, проводится “склеивание” расписаний смежных по обработке групп деталей для каждого производственного участка. Это позволяет сократить общее время обработки, поскольку некоторое оборудование цехов и участков начинает освобождаться раньше, чем на данном участке завершается обработка соответствующего каркаса. Для построения расписаний обработки групп деталей на производственных участках используются модули планирования соответствующих цехов и участков.

В производственных системах могут возникать нештатные ситуации, которые приводят к отклонениям от ранее составленных расписаний. В таких случаях требуется их корректировка. Для этого используются модули диспетчеризации уровня цеха и уровня завода.

Модуль выдачи заданий на производство является сервисным модулем, служащим для автоматизации внутрицехового документооборота.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Blomer F., Gunther H-O. LP-based heuristics for scheduling batch processes // Int. J. Product. Res. (2000). – Vol. 38. No. 5. – P. 1029–1051.
2. Хоботов Е. Н. Об одном подходе к планированию работы системы по смешению нефтепродуктов // АиТ. – 2004. – № 9. – С. 168–183.
3. Blomer F., Gunther H-O. LP-based heuristics for scheduling batch processes// Int. J. Product. Res. (2000). – Vol. 38. No. 5. – P. 1029–1051.
4. Конвей Р. В., Максвелл В. А., Миллер Л. В. Теория расписаний. – М.: Наука, 1975.
5. Горнев В. Ф., Емельянов В. В., Овсянников М. В. Оперативное планирование в ГПС. – М.: Машиностроение, 1990.
6. Уздемир А. П., Большаков В. А. Система планирования дискретного производства. – М.: ВНИИСИ. Препринт, 1983.

7. Исследование операций / Под ред. Дж. Моудера, С. Элмаграби. Т. 2. – М.: Мир, 1981.
8. Уздемир А. П. Динамические целочисленные задачи оптимизации в экономике. – М.: ИФ “Физико-математическая литература”, 1995.
9. Jan S n o e i j. Report “MES Product Survey 2008”, LogicaCMG, September 2008.
10. Panwalkar S., Iskander W. A survey of scheduling rules // Operations Research. – Vol. 25. No. 1 (Jan.–Feb., 1977). – P. 45–61.
11. Хоботов Е. Н. О некоторых моделях и методах решения задач планирования в дискретных производственных системах // Автоматика и телемеханика. – 2007. – № 12. – С. 85–100.
12. Haupt R. A survey of priority rule-based scheduling // OR Spectrum. – Vol. 11. No 1. – P. 3–16, March 1989.
13. Хоботов Е. Н. Использование оптимизационно-имитационного подхода для решения задач планирования и выбора маршрутов обработки. I // АиТ. – 1996. – № 1. – С. 121–128.
14. Хоботов Е. Н. Использование оптимизационно-имитационного подхода для решения задач планирования и выбора маршрутов обработки. II // АиТ. – 1996. – № 2. – С. 147–155.
15. Хоботов Е. Н. Использование оптимизационно-имитационного подхода для моделирования и проектирования производственных систем. I // АиТ. – 1999. – № 8. – С. 163–176.
16. Хоботов Е. Н. Использование оптимизационно-имитационного подхода для моделирования и проектирования производственных систем. II // АиТ. – 1999. – № 9. – С. 154–161.

Статья поступила в редакцию 25.03.09

Евгений Николаевич Хоботов родился в 1947 г., окончил МФТИ в 1972 г. Д-р техн. наук, профессор кафедры “Компьютерные системы автоматизации производства” МГТУ им. Н.Э.Баумана. Автор 96 научных работ в области теории расписаний, оптимизации, управления запасами.

Ye.N. Khobotov (b. 1947) graduated from the Moscow Physics and Technology Institute in 1972. D. Sc. (Eng.), professor of "Computer Systems of Production Automation" department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 96 publications in the field of scheduling theory, optimization, inventory management.

Михаил Сергеевич Куняев родился в 1986 г. Студент МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор одной научной работы. Специализируется в области теории расписаний, управления в производственных системах.

M.S. Kunyaev (b. 1986) — student of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 1 publication. Specializes in the field of theory of scheduling theory, management in production systems.

Антон Сергеевич Фирсов родился в 1985 г. Студент МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор одной научной работы. Специализируется в области теории расписаний, управления в производственных системах.

A.S. Firsov (b. 1985) — student of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 1 publication. Specializes in the field of theory of scheduling theory, management in production systems.