


УДК 658.513

Система планирования работ для машиностроительного предприятия с конвейерной сборкой изделий

М.А. Ермолова

МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

Workflow Planning System for a Machine Building Enterprise With Assembly Line Manufacturing

M.A. ErmolovaBMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1 e-mail: ermolova.88@mail.ru

i Представлен обзор систем планирования работ на машиностроительных предприятиях. Рассмотрены задачи построения расписаний работ на машиностроительных предприятиях с конвейерной сборкой изделий. Предложены методы решения задач путем агрегирования информации. Описан оригинальный алгоритм построения расписаний на уровне предприятия в целом. Приведена архитектура программной реализации системы планирования работ и результаты вычислительных экспериментов с этой системой. Решение тестовых задач различной размерности подтвердило эффективность предложенных методов.

Ключевые слова: теория расписаний, планирование, машиностроительные предприятия, обработка деталей, конвейерная сборка, методы агрегирования, алгоритм, программная система.

i The paper provides an overview of workflow planning systems used by machine building enterprises. Scheduling problems pertaining to machine building enterprises with assembly line manufacturing are considered. The information aggregation approach is used as a way to solve the scheduling problems. An original scheduling algorithm is described for the enterprise as a whole. The software architecture for the planning system and the results of calculations using this system are presented. The efficiency of the proposed methods is confirmed through solving test problems of various dimensions.

Keywords: scheduling theory, planning, machine-building enterprises, machining, assembly line production, aggregation methods, algorithm, software system.

Современные системы планирования работ на предприятии. В настоящее время повышение эффективности производственных процессов на машиностроительных предприятиях достигается за счет внедрения систем оперативного управления производством MES- (*Manufacturing Execution Systems* — системы управления производственными процессами) или APS-систем (*Advanced Planning & Scheduling Systems* — системы усовершенствованного планирования).

Системы MES относятся к классу систем, решающих задачи исполнения производства: детальное планирование, диспетчирование и отслеживание, анализ производительности, учет простоев, отслеживание качества продукции, управление производственными фондами, управление запасами материалов и готовой продукции и т. д.

В структуре систем промышленной автоматизации MES-системы занимают промежуточ-

ное место между автоматизированными системами диспетчерского управления SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition* — диспетчирование и сбор данных) и системами управления ресурсами предприятия ERP (*Enterprise Resource Planning* — планирование ресурсов предприятия), выполняя следующие функции:

- получение от системы ERP перечня работ, для которых требуется построить расписание;
- контроль и при необходимости немедленное корректирование производственного расписания в течение рабочей смены;
- сбор и хранение данных о текущих производственных показателях и передача их в систему ERP.

На российском рынке представлено большое число MES-систем как отечественной, так и зарубежной разработки. Проведенное исследование показало, что математический аппарат, используемый в этих системах, в большинстве случаев основан на эвристических алгоритмах. Например, в системе HYDRA (MPDV Mikrolab GmbH) оптимизация расписаний построена на эволюционной стратегии или на производственных правилах, в системе MES PHARIS (UNIS) — на генетических алгоритмах, а в системе IC:MES «Оперативное управление производством» (IC) — на эвристических алгоритмах, сочетающих жадные стратегии и стратегии ограниченного перебора. С точки зрения области применения практически все системы MES предназначены для решения задач планирования на уровне отдельных цехов и участков. Однако оптимизация работы подразделений не гарантирует оптимального результата на уровне всего предприятия [1–3].

Возможность построения расписания работ для всего оборудования предприятия предоставляют системы APS. Они могут функционировать как отдельно, так и в качестве надстройки ERP-системы предприятия.

К особенностям систем APS относится возможность их применения к различным средам планирования (дискретное или непрерывное производство), синхронность планирования, при которой планирование закупок и производства проводятся одновременно с учетом ограничений по мощностям и ресурсам, а также оптимизация математического аппарата применительно к конкретной отрасли конкретного предприятия [4].

Для составления планов большинство систем APS (SynQuest, ProMIRA и др.) используют метод эвристики. Для производственной системы определяют комбинацию ограничений на

ресурсы, правила или показатели и важность этих ограничений (жесткие или нежесткие). На первом шаге составляют допустимое расписание, удовлетворяющее требуемым срокам выпуска без нарушения жестких ограничений. На следующих проходах полученное расписание оптимизируют с учетом оставшихся нежестких ограничений.

Ряд производителей APS-систем (i2Technologies, Thru-Put Technologies, Berclain) включают в свои алгоритмы элементы теории ограничений. В производственном процессе выделяют операции — так называемые узкие места — и дальнейшее улучшение плана достигается планированием работы этих узких мест.

Таким образом, в результате упрощения алгоритмов построения расписания можно получать допустимые расписания для предприятий больших размерностей за приемлемое время. Однако полученные расписания могут быть достаточно далеки от действительного оптимума и, кроме того, не учитывать более сложных задач, например минимизации времен и переналадки оборудования, транспортных операций и т. п., что приведет к усложнению алгоритмов и как следствие — к невозможности осуществления расчетов расписания на уровне всего предприятия в реальном времени.

Исследование методов построения планов работ, применяемых в современных системах MES и APS, подтвердило актуальность задачи разработки новых методов построения расписаний на уровне всего предприятия с конвейерной сборкой готовых изделий.

Постановка задачи разработки системы планирования на предприятии. Рассмотрим задачу. Пусть на машиностроительном предприятии, где сборка изделий проводится на конвейерах, необходимо изготовить в течение планового периода L типов партий изделий. Размеры партии n_l ($l = 1, \dots, L$) изделий каждого типа заданы.

Сборка готовых изделий осуществляется на конвейере из произведенных деталей, а также закупленных на других предприятиях комплектующих деталей, узлов и агрегатов. Для сборки l -го изделия ($l = 1, \dots, L$) требуется R_{lr} узлов r -го типа ($r = 1, \dots, \tilde{R}_l$). Сборка узлов каждого типа может начаться после изготовления всех комплектующих деталей для этой группы узлов.

В задаче известны маршруты обработки и сборки всех деталей, время обработки и переналадки всего оборудования, а также состав и количество оборудования на каждом участке

предприятия. Известны основные характеристики конвейера: время и затраты на его переналадку, количество рабочих мест и время установки в каждое изделие комплектующих деталей, узлов и агрегатов на этих местах.

Требуется разработать систему планирования работ на таком предприятии, предоставляющую возможность за приемлемое время строить расписание обработки деталей для заданного планового периода.

Важным требованием к системе планирования работ является возможность построения расписаний работ на уровне предприятия в целом, а не для отдельных его подразделений. При этом возникает задача хранения и обработки большого числа данных, так как речь идет о расчете расписания обработки более 100 000 деталей, для каждой из которых определен свой технологический маршрут обработки.

В результате проведения исследования систем хранения данных была выбрана бесплатная документоориентированная база данных MongoDB. К ее достоинствам следует отнести кроссплатформенность, масштабируемость, а также поддержку больших и сложных массивов данных, поскольку при построении расписания на уровне предприятия приходится иметь дело с сотнями тысяч деталей и единиц оборудования. Кроме того, важной характеристикой MongoDB является более высокая производительность, чем у реляционных баз данных, что позволяет приложению с высокой скоростью обмениваться данными с системой управления базой данных (СУБД) и получать информацию обо всех деталях, маршрутах их обработки и производственных подразделениях.

В системе планирования должен поддерживаться ручной ввод данных об изделиях, числе технологических и вспомогательных операций, их времени, маршрутах обработки деталей, числе производственных подразделений предприятия и о находящемся в них обрабатываемом оборудовании. Также должна быть реализована подсистема расчета расписаний, учитывающая особенности предприятий, на которых сборка готовых изделий проводится на конвейерах.

Особенностью производств с конвейерной сборкой изделий является то, что сборку готовых изделий, как правило, начинают, когда на каждое рабочее место конвейера доставлено одно и то же количество комплектов деталей, узлов и агрегатов, из которых будут собираться выпускаемые изделия [5]. Таким образом обеспечивается ритмичная работа конвейера и

упрощается снабжение рабочих мест сборки комплектующими. Еще одно ограничение накладывается на систему в том случае, если на предприятии работает несколько конвейеров: на каждом конвейере собирается определенная группа изделий и изделие каждого типа может собираться только на данном конвейере.

Изготовление всех комплектующих деталей, узлов и агрегатов для выпускаемых изделий проводится в цехах и на производственных участках предприятия. Количество комплектующих, а также используемого для их изготовления оборудования может быть весьма большим, что приводит к значительным и не всегда преодолимым затруднениям при попытках построения расписаний изготовления комплектующих с помощью традиционных методов.

В связи с этим для планирования и построения расписаний работ, выполняемых для изготовления комплектующих, предлагается использовать агрегирование информации. Суть его заключается в разделении деталей, для которых строится расписание обработки, на группы таким образом, чтобы все детали каждой группы при обработке проходили бы производственные подразделения предприятия в одной последовательности [1]. Сформированные таким образом группы деталей рассматриваются как обобщенные детали, а производственные подразделения предприятия, через которые при своей обработке проходят эти группы, — как обобщенные станки.

Затем с помощью традиционных методов либо оценочных моделей [1, 6, 7] можно определить время обработки групп деталей на всех обобщенных станках. После чего, используя традиционные методы построения расписаний, строят планы обработки сформированных групп деталей на производственных участках предприятия, что позволяет получить оценку времени обработки комплектующих на предприятии. В работе [8] такое расписание названо «каркасным». Использование традиционных методов построения расписаний [9, 10] для его построения оказывается возможным, поскольку количество обобщенных деталей и станков значительно меньше исходного их количества за счет применения описанных выше идей агрегирования и становится приемлемым для этих методов.

После завершения подготовки комплектующих и отправки их на конвейер начинается обработка комплектующих для сборки следующей группы изделий. Данное каркасное рас-

писание «приклеивается» к уже сформированному каркасному расписанию изготовления комплектующих деталей, узлов и агрегатов для ранее изготавливаемых на предприятии изделий.

Алгоритм построения расписания работ для обработки комплектующих и сборки из них готовых изделий на предприятиях с конвейерной сборкой изделий приведен на рис. 1.

В системе необходимо реализовать и модуль, отвечающий за предоставление пользователю выходной информации в следующих видах:

- графика работ — диаграммы Ганта;
- расписания обработки выбранной детали изделия;
- сменно-суточного задания для конкретного рабочего места;
- коэффициента загрузки оборудования.

Архитектура и принципы построения системы планирования работ. Разработанная система является комплексом программных мо-

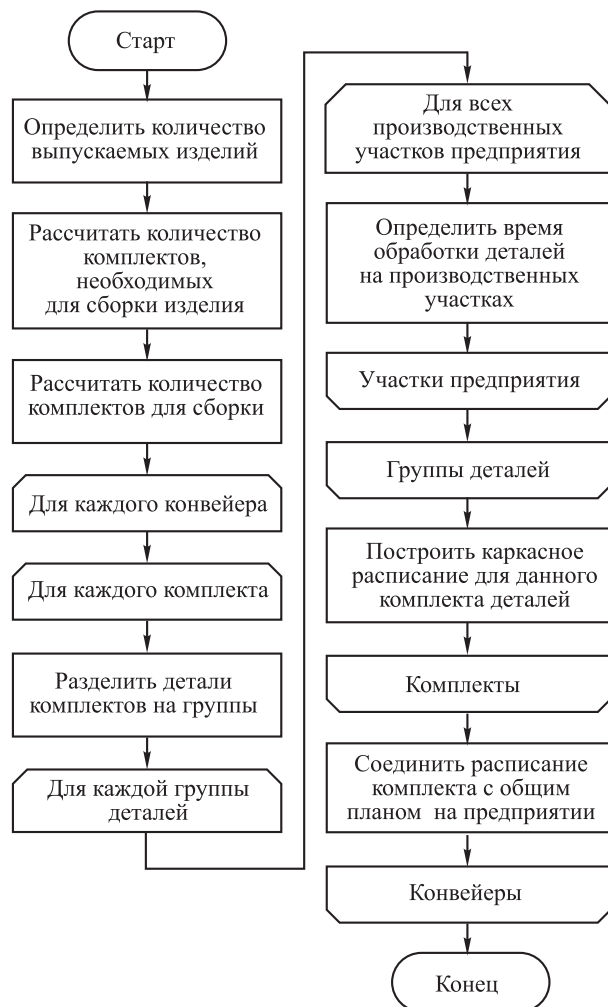


Рис. 1. Алгоритм построения расписаний

дулей, обеспечивающих ее функционирование. Программный комплекс состоит из следующих модулей:

- просмотра и редактирования технологической информации;
- работы с заказами, отображения расписаний;
- расчета и построения расписаний;
- сбора и обработки статистики;
- формирования каркасных расписаний;
- формирования отчетов.

Программа представляет собой приложение Windows, написанное на языке C# для платформ Microsoft.Net Framework 4 и Parallel Extensions для Microsoft.Net Framework компании Microsoft. В качестве среды разработки выбрана Visual Studio 2010, поддерживающая выбранный язык программирования.

При построении расписания на уровне всего предприятия требуется значительное число данных, ввод которых вручную является довольно трудоемким, поэтому для проведения вычислительных экспериментов использовалась генерация исходных данных с помощью датчика случайных чисел. В качестве распределения случайной величины принято равномерное распределение.

Для приближения сгенерированной информации к получаемой от реальных предприятий в модуле генерации исходных данных (рис. 2) предусмотрен ввод интервалов значений количества изделий, сборочных единиц, станков, величин спроса, производительности конвейеров, а также времени изготовления деталей. Это позволяет, зная только статистические данные предприятия, осуществлять построение расписаний работ.

В модуле просмотра и редактирования технологической информации пользователь может добавлять, изменять и удалять изделия, детали и маршруты их обработки.

% от общего количества изделий	10	15	20	25	30
Количество деталей на уровне	15	19	25	60	55
Количество операций	10	5	9	12	11

Рис. 2. Генерация данных об изделиях

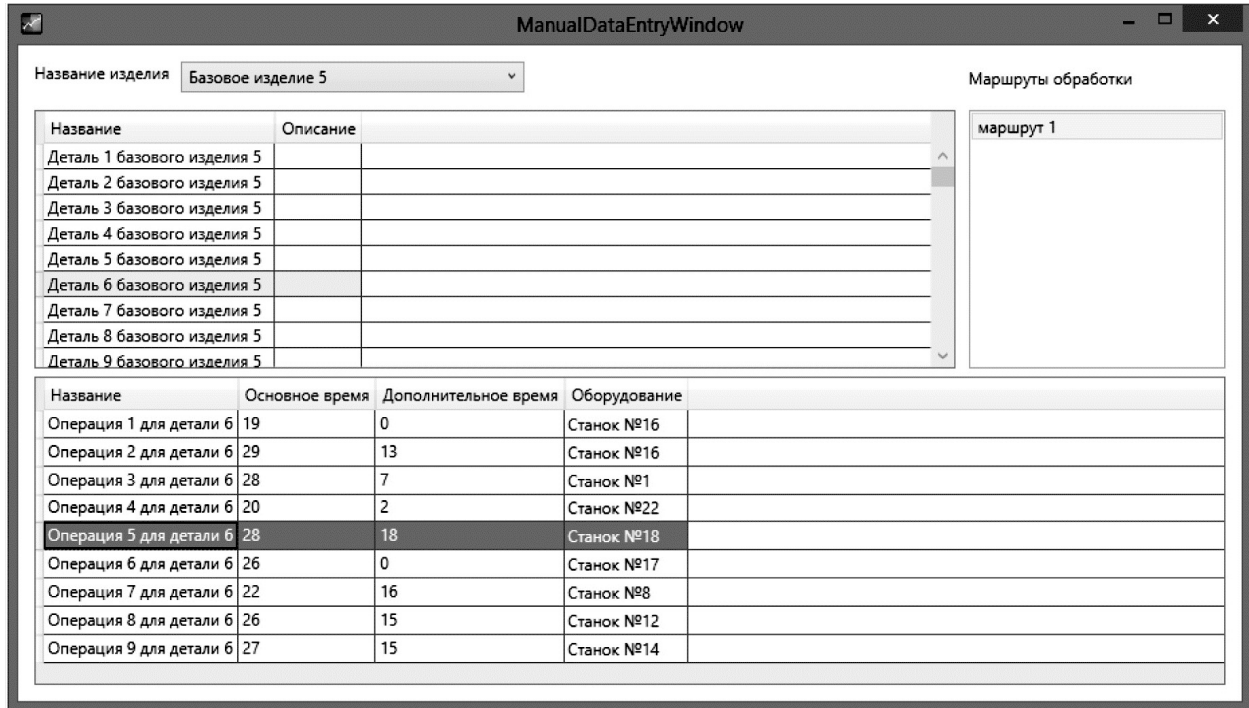


Рис.3. Окно ввода и редактирования информации о составе изделий

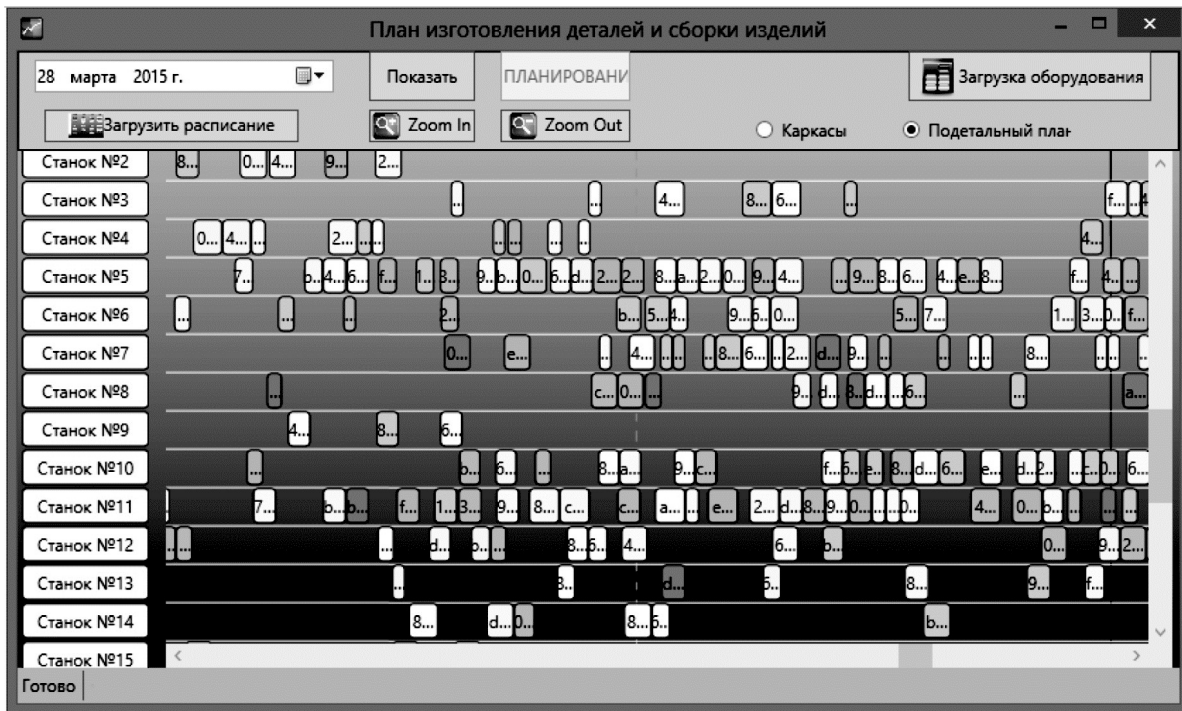


Рис. 4. Окно графического вывода диаграмм Гантта

На рис. 3 приведено окно ввода и редактирования информации об изделии. В верхней части окна в раскрывающемся списке приведены названия изделий. Для выбранного изделия в левой части окна приводится список деталей, входящих в его состав, а в правой — для конкретной детали — список маршрутов

обработки. В нижней части окна для выбранной детали и маршрута ее обработки показана последовательность операций обработки детали по выбранному маршруту со станками, на которых должна выполняться каждая операция, временами их выполнения и переналадок станка. Эта информация может как вводиться

Информация	
Количество обчисленных операций	97959
Время изготовления заказа	26 дн. 6 ч. 6 мин. 120 мс.
Заказ будет изготовлен к	24 апреля 2015 04:31
Время, затраченное на построение расписания	30 мин. 51 сек. 845 мс.

Рис. 5. Отчетная информация

Результаты вычислений

Изделий	Деталей	Операций	Станков	Конвейеров	Время расчета
20	21 183	97 959	30	1	30 мин 52 с
25	50 999	293 019	42	1	47 мин 36 с
35	95 367	512 975	45	2	1 ч 15 мин
70	296 387	967 251	50	2	2 ч 45 мин

заново, так и редактироваться по мере необходимости.

Модуль работы с заказами предназначен для создания нового заказа, описания входящих в него изделий и запуска расчета плана для их производства.

В модуле расчета и построения расписаний реализуется приведенный алгоритм (см. рис. 1). Вычислительные эксперименты доказали его эффективность для планирования и построения расписаний работ для предприятий с конвейерной сборкой изделий. Результаты этих экспериментов приведены ниже.

Модуль отображения расписаний предназначен для графического отображения построенных планов работ и взаимодействия с ними. В этом модуле производственная программа представляется в виде диаграмм Гантта (рис. 4).

В модуле формирования отчетов собираются данные о сроках изготовления каждого изделия заказа, времени начала и окончания операций по обработке комплектующих на всем используемом оборудовании (рис. 5). Пользователю доступна информация и о заказе в целом, и о каждой детали изделия.

При помощи описанной выше системы решались тестовые задачи различной размерности, которые подтвердили эффективность предложенных алгоритмов для построения планов работ. Все эксперименты проводились на компьютере с объемом оперативной памяти 6 Гб, работающем на двухъядерном процессоре Intel(R) Core(TM) i5-4200 с тактовой частотой 1,6 ГГц. Результаты вычислений приведены в таблице.

Литература

- [1] Хоботов Е.Н. О некоторых моделях и методах решения задач планирования в дискретных производствах. *Автоматика и телемеханика*, 2007, № 12, с. 85–100.
- [2] Сидоренко А.М., Хоботов Е.Н. Планирование производств с параллельной сборкой изделий. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2009, № 3, с. 100–109.
- [3] Куняев М.С., Фирсов А.С., Хоботов Е.Н. Выбор подхода к построению системы планирования работ на машиностроительном предприятии. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2009, № 4, с. 91–102.
- [4] Фролов Е.Б., Загидуллин Р.Р. MES-системы, как они есть, или эволюция систем планирования производства. *Станочный парк*, 2008, № 10 (55), с. 31–37.
- [5] Ермолова М.А., Хоботов Е.Н. Система планирования и построения расписаний работ для предприятий с конвейерной сборкой изделий. *Автоматизация в промышленности*, 2014, № 8, с. 3–8.
- [6] Хоботов Е.Н. Использование оптимизационно-имитационного подхода для решения задач планирования и выбора маршрутов обработки. Ч. I. *Автоматика и телемеханика*, 1996, № 1, с. 121–128.

- [7] Хоботов Е.Н. Использование оптимизационно-имитационного подхода для решения задач планирования и выбора маршрутов обработки. Ч. II. *Автоматика и телемеханика*, 1996, № 2, с. 147–155.
- [8] Сидоренко А.М., Хоботов Е.Н. Агрегирование при планировании работ на машиностроительных предприятиях. *Известия российской академии наук. Теория и системы управления*, 2013, № 5, с. 132–144.
- [9] Конвей Р.В., Максвелл В.А., Миллер Л.В. *Теория расписаний*. Москва, Наука, 1975. 360 с.
- [10] Зак Ю.А. *Прикладные задачи теории расписаний и маршрутизации перевозок*. Москва, Издательство «Либроком», 2011. 393 с.

References

- [1] Khobotov E.N. On some models and methods of the solution of scheduling problems in discrete enterprises. *Automation and Remote Control*, 2007, vol. 68, no. 12, pp. 2172–2186.
- [2] Sidorenko A.M., Khobotov E.N. Planirovanie proizvodstv s parallel'noi sborkoi izdelii [Planning of Production Shops with Parallel Assembly of Items]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie* [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Mechanical Engineering]. 2009, no. 3, pp. 100–109.
- [3] Kuniaev M.S., Firsov A.S., Khobotov E.N. Vybor podkhoda k postroeniiu sistemy planirovaniia rabot na mashinostroitel'nom predpriatii [Selection of Approach to Construction of System of Planning Operations at Machine Building Enterprise]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie* [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Mechanical Engineering]. 2009, no. 4, pp. 91–102.
- [4] Frolov E.B., Zagidullin R.R. MES-sistemy, kak oni est', ili evoliutsiia sistem planirovaniia proizvodstva [MES-systems, as they are, or the evolution of production planning systems]. *Stanochnyi park* [Machinery equipment]. 2008, no. 10(55), pp. 31–37.
- [5] Ermolova M.A., Khobotov E.N. Sistema planirovaniia i postroeniia raspisaniia rabot dlia predpriatii s konveiernoi sborkoi izdelii [The system of planning and scheduling of construction works for businesses from the conveyor assembly products]. *Avtomatizatsiia v promyshlennosti* [Automation industry]. 2014, no. 8, pp. 3–8.
- [6] Khobotov E.N. Ispol'zovanie optimizatsionno-imitatsionnogo podkhoda dlia resheniia zadach planirovaniia i vybora marshrutov obrabotki. Ch. I [Optimization-simulation approach to scheduling and routing. I]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and remote control]. 1996, no. 1, pp. 121–128.
- [7] Khobotov E.N. Ispol'zovanie optimizatsionno-imitatsionnogo podkhoda dlia resheniia zadach planirovaniia i vybora marshrutov obrabotki. Ch. II [Optimization-simulation approach to scheduling and routing. II]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and remote control]. 1996, no. 2, pp. 147–155.
- [8] Sidorenko A.M., Khobotov E.N. Aggregation in job scheduling in machine works. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2013, vol. 52, no. 5, pp. 800–810.
- [9] Konvei R.V., Maksvell V.A., Miller L.V. *Teoriia raspisaniia* [Scheduling theory]. Moscow, Nauka publ., 1975. 360 p.
- [10] Zak Iu.A. *Prikladnye zadachi teorii raspisaniia i marshrutizatsii perevozok* [Applied problems of scheduling and routing traffic]. Moscow, Librokom publ., 2011. 393 p.

Статья поступила в редакцию 03.06.2015

Информация об авторе

ЕРМОЛОВА Мария Алексеевна (Москва) — аспирант кафедры «Компьютерные системы автоматизации производства». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: ermolova.88@mail.ru).

Information about the author

ERMOLOVA Maria Alekseevna (Moscow) — Post Graduate, Department of Computer Systems for Manufacture Automation. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: ermolova.88@mail.ru).