

УДК 658.513

DOI 10.18698/0536-1044-2017-5-72-78

Построение расписаний транспортирования деталей между подразделениями машиностроительных предприятий

Е.Н. Хоботов¹, М.А. Ермолова¹, Е.Е. Дудников²

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

² Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 117997, Москва, Российская Федерация, Профсоюзная ул., д. 65

Scheduling Transportation of Components between Sites of a Manufacturing Plant

E.N. Khabotov¹, M.A. Ermolova¹, E.E. Dudnikov²

¹ BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1

² V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, 117997, Moscow, Russian Federation, Profsoyuznaya St., Bldg. 65



e-mail: e_khabotov@mail.ru, ermolova.88@mail.ru, e_dudnik@ipu.ru



Транспортные расходы составляют значительную долю затрат на изготовление продукции, поэтому проблема построения расписаний транспортирования деталей является актуальной задачей. Однако в настоящее время ей не уделяется достаточного внимания. Предложены методы построения планов и расписаний транспортирования комплектующих, использующие идеи агрегирования информации. Сформулирована задача транспортирования комплектующих деталей и узлов между участками машиностроительного предприятия с конвейерной сборкой готовых изделий. Описан алгоритм построения расписаний транспортных операций на уровне предприятия, учитывающий полученные результаты предварительно сформированных «каркасных» расписаний обработки деталей и узлов. Приведены результаты вычислительных экспериментов с программным прототипом системы, реализующим разработанный алгоритм, которые подтверждают эффективность предложенных методов для построения расписаний транспортирования комплектующих между производственными подразделениями машиностроительного предприятия.

Ключевые слова: планирование работ, машиностроительные предприятия, обработка деталей, конвейерная сборка, транспортирование деталей, агрегирование.



Transportation expenses represent a considerable share of the overall manufacturing costs. The task of transportation scheduling is very important but often it is not given due attention. This paper provides planning and scheduling methods for transportation of components using the ideas of information aggregation. The problem of transporting components between the sites of a machine-building plant with line assembly of finished products is formulated. The authors develop an algorithm for scheduling transportation operations at the plant level that takes into account pre-set, basic schedules of machining operations for parts and components. The results of computational experiments with the prototype software system that implements the developed algorithm are given. The results confirm the effectiveness of the proposed methods for scheduling transportation of components between the sites of a machine-building plant.

Keywords: works scheduling, machine-building enterprises, machining, assembly line, transportation of components, aggregation.

В последние годы во всех индустриально развитых странах много внимания уделяется повышению эффективности работы промышленных предприятий. Для этих целей широко применяются методы планирования и построения расписаний работ по изготовлению комплектующих и сборке из них изделий [1–5].

В статье [6] для построения расписаний обработки комплектующих на уровне предприятий предложен подход, использующий агрегирование информации. Необходимость их создания вызвана тем, что даже из самых удачных планов работ отдельных систем и участков не всегда можно сформировать удовлетворительные расписания работы предприятий [6, 7].

Однако проблемам организации, планирования и построения расписаний выполнения транспортных операций не уделяется должного внимания, несмотря на то что затраты на снабжение оборудования машиностроительных предприятий заготовками, деталями и инструментами, а также на пополнение ими складов составляют 10...60 % (а иногда достигают 80 %) затрат на изготовление продукции [8, 9].

Цель работы — разработка методов, позволяющих на основе расписаний изготовления комплектующих (деталей и узлов) на предприятиях, где сборка выпускаемых изделий осуществляется на конвейерах, строить планы и расписания их транспортирования между производственными подразделениями предприятий (ППП).

Постановка задачи планирования с учетом транспортирования деталей. Рассмотрим более подробно постановки задач планирования и построения расписаний работ по изготовлению и транспортированию комплектующих между ППП.

Пусть на машиностроительном предприятии, в состав которого входит M производственных участков, используемых для обработки комплектующих, имеется несколько конвейеров для сборки выпускаемых изделий. При этом известны размеры партии изделий каждого типа n_l ($l = 1, \dots, L$), маршруты обработки и сборки всех деталей, время обработки и переналадки оборудования, а также его состав и количество на каждом участке предприятия. После завершения обработки комплектующих на одном участке их транспортируют на другие для продолжения рабочего процесса. Известна

также производительность каждого конвейера по изготовлению изделий всех типов.

Транспортирование комплектующих деталей и узлов между участками в процессе их изготовления можно проводить с помощью K типов транспортных средств (ТС), которые способны перевозить различное количество деталей. Для каждого ТС определяется количество деталей, которое оно может перевести за один рейс. Время движения ТС k -го типа ($k = 1, \dots, K$) при перевозке деталей от склада i -го участка до склада j -го участка и обратно — t_{ij}^k , а время погрузки–разгрузки ТС k -го типа — τ^k .

Расписание обработки комплектующих на каждом производственном участке предприятия и расписание транспортирования деталей между его подразделениями необходимо построить так, чтобы изготовить заданное количество изделий определенных типов за минимальное время.

Для решения этой задачи разработаны алгоритмы построения расписаний: обработки комплектующих на уровне предприятия и каждого производственного участка, а также транспортирования деталей между ППП.

Планирование и построение расписаний работ по изготовлению комплектующих. Расписание транспортирования деталей между ППП следует создавать на основе плана их обработки в этих подразделениях, поскольку только по нему можно определить, когда их изготовление будет завершено.

Для планирования и построения расписаний работ разработано большое количество методов и программных продуктов [10]. Однако часть этих методов предназначена для отдельных участков и производственных систем, а на их основе, как уже отмечалось, часто невозможно создать приемлемые планы работ предприятий [6, 7].

В статье [6] для построения расписаний работ предприятий, в состав которых входит несколько ППП, предложен подход, базирующийся на идее агрегирования информации. Эта идея заключается в формировании групп деталей (ГД), где каждая деталь при обработке проходит ППП в одном и том же порядке. ГД рассматриваются как обобщенные детали (ОД), а ППП — как обобщенные станки (ОС). Тогда задачу создания расписания обработки ГД на предприятии можно представить как задачу построения расписания изготовления ОД

на ОС. Для ее решения необходимо определить время производства каждой ОД на всех ОС, т. е. время изготовления каждой ГД на используемых ППП. Это можно сделать с помощью традиционных методов [2–5] или оценочных моделей [6]. Пример расписания обработки ГД, названного «каркасным» [6], приведен на рис. 1, где прямоугольники на диаграмме Ганта обозначают ОД, каждая из которых выделена своим цветом, и их обработку на ППП в течение времени t . Из «каркасного» расписания можно получить время \hat{T}_v завершения обработки последней ОД.

Организация изготовления комплектующих в ППП группами, сформированными в соответствии с указанными выше принципами, представляется весьма полезной. Это позволит не только строить согласованное для всех ППП расписание работ по производству комплектующих, но и организовывать эффективное транспортирование деталей между ППП. Эффективность этой операции обеспечивается благодаря тому, что после завершения обработки в одном ППП все детали каждой ГД должны быть перемещены в другое подразделение — одно и то же для всех них в соответствии с маршрутом обработки этой ГД.

Для сокращения времени и повышения эффективности использования ТС транспортирование целесообразно начинать, когда все детали группы могут быть перевезены без перерывов на ожидание завершения обработки каких-либо из них.

Время завершения производства каждой ГД на любом ППП можно определить только по построенному расписанию изготовления деталей этой группы на участках предприятия, т. е. по «каркасному» расписанию. Указанное время можно увидеть на диаграмме Ганта, представляющей собой «каркасное» расписание обработки ГД на предприятии (см. рис. 1).

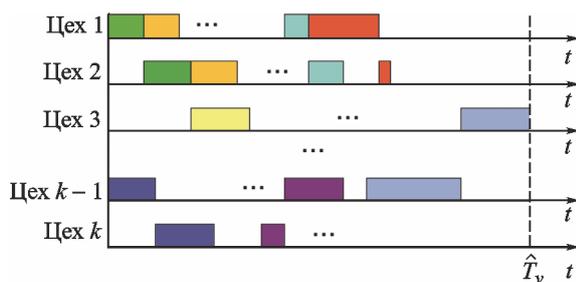


Рис. 1. Фрагмент «каркасного» расписания обработки ГД на уровне предприятия

Для деталей каждого типа известно их количество, которое можно разместить на одном поддоне или паллете, предназначенной для их хранения и транспортирования. Поэтому, зная количество и типы поддонов и паллет, необходимых для перевозки деталей группы между оборудованием и участками, их габаритные размеры и массу, а также вид, количество и грузоподъемность ТС, время погрузки и движения ТС между участками, можно построить расписание транспортирования деталей на следующий участок и определить продолжительность и время завершения доставки [11]. Размеры поддонов или паллет для проведения расчетов и построения таких расписаний удобно задавать в долях от грузоподъемности ТС.

Следует отметить, что в условиях традиционного изготовления комплектующих, когда после завершения обработки на одном участке детали поступают для ее продолжения на другие производственные участки, их эффективное транспортирование организовать весьма сложно, не говоря уже о построении расписания их перевозки. Это, по-видимому, является одной из важнейших причин того, что в мелкосерийном производстве детали только около 10 % времени находятся в обработке, а остальные 90 % пролеживают на складах производственных участков предприятия в ожидании доставки к станкам и на другие участки для продолжения их изготовления или транспортируются [12].

Построение расписаний транспортирования деталей позволит не только сократить время их доставки на обработку, но и более эффективно использовать ТС для их перевозки между ППП.

Алгоритм построения расписаний работ по обработке комплектующих на предприятии с учетом их транспортирования между производственными подразделениями состоит из следующих шагов.

1. Определить количество изделий разных типов, которое требуется изготовить в соответствии со спросом на продукцию. Переход к шагу 2.

2. Для l -го изделия на основании его состава найти множество деталей D_l и узлов R_l , из которых оно собирается. Переход к шагу 3.

3. Для каждого конвейера определить размер партии собираемых изделий, для которой изготавливаются комплектующие, и для нее сформировать партию комплектующих раз-

личных типов таким образом, чтобы из них можно было собрать эту партию изделий. Переход к шагу 4.

4. Для комплектующих каждой партии собираемых изделий распределить детали по группам, в каждую из которых входят те, которые имеют один и тот же порядок обработки в ППП. Переход к шагу 5.

5. Определить время обработки сформированных ГД на всех ППП с использованием оценочных моделей или путем построения расписаний обработки. Переход к шагу 6.

6. Построить «каркасное» расписание обработки комплектующих на всех ППП. Порядок прохождения ППП для каждой ГД известен из правила распределения деталей по группам. Переход к шагу 7.

7. «Приклеить» «каркасное» расписание обработки деталей к ранее построенному «каркасному» расписанию изготовления комплектующих для предыдущей партии изделий. Переход к шагу 8.

8. Провести проверку количества изделий, которые требовалось изготовить. Если данная партия изделий была последней в производственной программе, то осуществляется переход к шагу 9. В противном случае следует переход к шагу 4 для построения расписания обработки следующей партии изделий.

9. Сформировать по возрастанию времени последовательность групп комплектующих, изготовление которых завершено на соответствующем участке и которые необходимо доставить на следующий участок для продолжения производственного процесса. Последовательность групп формируется с учетом требуемого количества изделий разных типов в соответствии со спросом на продукцию. Переход к шагу 10.

10. Вычислить количество передаточных партий комплектующих в группе из сформированной на участке последовательности групп, в которой раньше, чем в других, закончится обработка. Определить количество и типы ТС, которые выделены для доставки комплектующих в этой группе на другой участок по маршруту обработки. Переход к шагу 11.

11. Для каждой группы деталей к времени окончания обработки передаточной партии прибавить время контрольных операций t_{ch} и определить время транспортирования T_{jl} с j -го участка на следующий по маршруту обработки с использованием выделенного для этого коли-

чества и типов ТС. Из сформированной последовательности групп исключить ту, для которой начало и время транспортирования определено. Переход к шагу 12.

12. Для каждой партии деталей выполнить проверку состояния следующего по маршруту участка $j + 1$:

- если участок $j + 1$ занят, то провести расчет времени окончания обработки и запуск в этот момент на обработку передаточной партии. Переход к шагу 13;

- если на участке $j + 1$ должно начаться изготовление деталей во время обработки деталей, доставленных с участка j , то следует перестроить расписание. Переход к шагу 13;

- если участок $j + 1$ свободен, то детали передаточной партии запускаются на обработку. Переход к шагу 13.

13. Провести проверку наличия групп в их сформированной последовательности, для которой еще не определено время транспортирования. Если такие группы есть, то перейти к шагу 10. Если их нет, то сформировать отчет, включающий в себя планы и расписания работ по выполнению производственной программы, а также расписание транспортирования деталей. Вычисления завершаются.

Следует пояснить, что необходимость определения размеров партий собираемых изделий, проводимого на шаге 3, вызвана наличием ограничений, связанных с возможностями предприятия по хранению и размещению готовых комплектующих. Поэтому для сборки изделий даже одного типа производятся партии комплектующих, размеры которых не должны превышать заданных значений. После обработки и отправки на сборку комплектующих, если необходимое количество еще не сделано, изготавливаются новые партии того же типа, или же обрабатываются комплектующие для сборки изделий других типов.

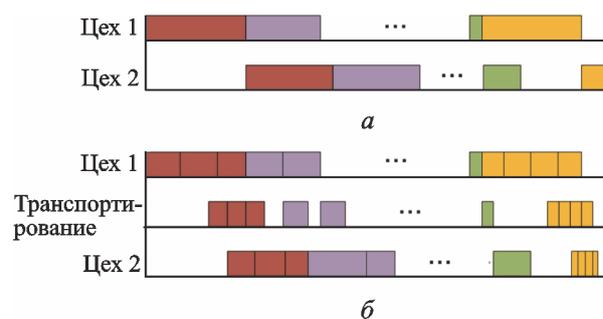


Рис. 2. Фрагмент расписания обработки деталей без учета (а) и с учетом (б) их транспортирования

Результаты расчета

изделий	Количество, шт.				Время расчета
	деталей	операций	станков	конвейеров	
25	51 387	249 851	40	1	51 мин 31 с
35	97 461	523 976	40	1	1 ч 24 мин
75	329 672	1 304 759	50	2	2 ч 48 мин
85	401 287	1 589 731	50	2	3 ч 05 мин
100	526 179	1 897 632	50	2	3 ч 35 мин

Результат работы предложенного алгоритма в графическом виде представлен на рис. 2, где разными цветами выделены ГД.

Из рис. 2 видно, что разделение деталей на транспортные партии во многих случаях позволяет начать их транспортирование раньше, чем закончится обработка всей группы, что сократит простой оборудования на смежном участке. Построение «каркасных» расписаний совместно с расписанием транспортирования деталей между ППП для продолжения их обработки дает возможность более обоснованно распределять ТС между подразделениями предприятия.

Описанный алгоритм был запрограммирован, и с ним проведены вычислительные эксперименты для построения планов работ. Расчет выполнен на компьютере с оперативной памятью 6 Гб, работающем на двухъядерном процессоре Intel (R) Core (TM) i5-4200 с тактовой частотой 1,6 ГГц. Результаты расчета приведены в таблице.

Выводы

1. Рассмотрена задача планирования и построения расписаний работ по изготовлению и транспортированию комплектующих деталей между ППП, где сборка готовых изделий осуществляется на конвейерах.

2. Предложен метод, основанный на идее агрегирования информации, позволяющий строить согласованные расписания работ обработки комплектующих с учетом их транспортирования между ППП.

3. На основе предложенного метода разработан алгоритм построения расписаний работ по обработке комплектующих на предприятии с учетом их транспортирования между ППП.

4. Проведены вычислительные эксперименты с программной реализацией созданного алгоритма, подтвердившие работоспособность предложенного метода.

Литература

- [1] Jain A.S., Meeran S. Theory and Methodology. Deterministic job-shop scheduling: Past, present and future. *European Journal of Operational Research*, 1999, no. 113, pp. 390–434.
- [2] Зак Ю.А. *Прикладные задачи теории расписаний и маршрутизации перевозок*. Москва, Либроком, 2011. 393 с.
- [3] Bruker P. *Scheduling Algorithms*. Leipzig, Springer, 2007. 371 p.
- [4] Pinedo M.L. *Planning and Scheduling in Manufacturing and Services*. Dordrecht, Heidelberg, London, New York, Springer, 2009. 536 p.
- [5] Pinedo M.L. *Scheduling. Theory, Algorithms, and Systems*. Dordrecht, Heidelberg, London, New York, Springer, 2008. 665 p.
- [6] Хоботов Е.Н. О некоторых моделях и методах решения задач планирования в дискретных производственных системах. *Автоматика и телемеханика*, 2007, № 12, с. 85–100.
- [7] 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.
- [8] Макушин А.А. Особенности сборки автомобилей и узлов. *Сборка в машиностроении, приборостроении*, 2010, № 5, с. 30–38.
- [9] Горский С.С. Повышение эффективности транспортных систем путем оптимизации материальных потоков на производственных участках механосборочного производ-

- ства. *Известия Московского государственного технического университета МАМИ*, 2009, т. 1, вып. 2, с. 195–201.
- [10] Ермолова М.А. Система планирования работ машиностроительного предприятия с конвейерной сборкой готовой продукции. *Молодежный научно-технический вестник*, 2015, № 11. URL: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/817720.html> (дата обращения 15 января 2017).
- [11] Хоботов Е.Н., Дудников Е.Е., Ермолова М.А. О построении расписаний транспортировки деталей на машиностроительных предприятиях. *Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM-2016)*. Матер. 16-й Междунар. конф., Москва, 17–19 октября 2016 г., Москва, Аналитик, 2016, с. 332–335.
- [12] Базаров Б.М. *Основы технологии машиностроения*. Москва, Машиностроение, 2005. 736 с.

References

- [1] Jain A.S., Meeran S. Theory and Methodology. Deterministic job-shop scheduling: Past, present and future. *European Journal of Operational Research*, 1999, no. 113, pp. 390–434.
- [2] Zak Iu.A. *Prikladnye zadachi teorii raspisaniia i marshrutizatsii perevozok* [Applied problems of scheduling and transportation routing]. Moscow, Librokom publ., 2011. 393 p.
- [3] Bruker P. *Scheduling Algorithms*. Leipzig, Springer, 2007. 371 p.
- [4] Pinedo M.L. *Planning and Scheduling in Manufacturing and Services*. Dordrecht, Heidelberg, London, New York, Springer, 2009. 536 p.
- [5] Pinedo M.L. *Scheduling. Theory, Algorithms, and Systems*. Dordrecht, Heidelberg, London, New York, Springer, 2008. 665 p.
- [6] Khabotov 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.
- [7] Sidorenko A.M., Khabotov E.N. Aggregation in job scheduling in machine works. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2013, vol. 52, no. 5, pp. 800–810.
- [8] Makushin A.A. Osobennosti sborki avtomobilei i uzlov [Features of assembling cars and units]. *Sborka v mashinostroenii, priborostroenii* [Assembling in Mechanical Engineering and Instrument-Making]. 2010, no. 5, pp. 30–38.
- [9] Gorskii S.S. Povyshenie effektivnosti transportnykh sistem putem optimizatsii material'nykh potokov na proizvodstvennykh uchastkakh mekhanosborochного производства [Effectiveness increase of retrieval system by optimization of material flows at the production area of mechanical assembly production]. *Izvestiia Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta MAMI* [Izvestiya MGTU MAMI]. 2009, vol. 1, is. 2, pp. 195–201.
- [10] Ermolova M.A. Sistema planirovaniia rabot mashinostroitel'nogo predpriiatiia s konveiernoi sborkoi gotovoi produktsii [System for planning the work of a machine-building enterprise with assembly of finished products]. *Molodezhnyi nauchno-tekhnicheskii vestnik* [Youth scientific and technical bulletin]. 2015, no. 11. Available at: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/817720.html> (accessed 15 January 2017).
- [11] Khabotov E.N., Dudnikov E.E., Ermolova M.A. O postroenii raspisaniia transportirovki detalei na mashinostroitel'nykh predpriiatiakh [About the scheduling the transportation of parts for machine-building enterprises]. *16-ia mezhdunarodnaia konferentsiia Sistemy proektirovaniia, tekhnologicheskoi podgotovki proizvodstva i upravleniia etapami zhiznennogo tsikla promyshlennogo produkta CAD/CAM/PDM-2016*, Moskva, 17–19 oktiabria 2016, tr. [Proceedings 16th international conference System of design, technological preparation of production and management stages of the life cycle of industrial product CAD/CAM/PDM-2016, Moscow, 17–19 October 2016]. Moscow, Analitik publ., 2016, pp. 332–335.
- [12] Bazarov B.M. *Osnovy tekhnologii mashinostroeniia* [Fundamentals of mechanical engineering technology]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2005. 736 p.

Информация об авторах

ХОБОТОВ Евгений Николаевич (Москва) — доктор технических наук, профессор кафедры «Компьютерные системы автоматизации производства». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: e_khobotov@mail.ru).

ЕРМОЛОВА Мария Алексеевна (Москва) — ассистент 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).

ДУДНИКОВ Евгений Евгеньевич (Москва) — доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории управления технологическими процессами. Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН (117997, Москва, Российская Федерация, ул. Профсоюзная, д. 65, e-mail: e_dudnik@ipu.ru).

Information about the authors

KHOBOTOV Evgeniy Nikolayevich (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Computer Systems for Production Automation. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: e_khobotov@mail.ru).

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

DUDNIKOV Evgeniy Evgenyevich (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Leading Researcher of Process Control Laboratory. V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences (117997, Moscow, Russian Federation, Profsoyuznaya St., Bldg. 65, e-mail: e_dudnik@ipu.ru).



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышла в свет монография
под редакцией Д.А. Ягодникова
«Актуальные проблемы
ракетного двигателестроения»

Приведена классификация конверсионных технологий на основе ракетных и реактивных двигателей. Рассмотрены основные методы термо- и газодинамического расчета характеристик рабочего тела и рабочего процесса в камерах сгорания конверсионных разработок. Представлены примеры проектирования и практического использования технологических установок газопламенной обработки конструкционных материалов, сверхзвукового напыления многофункциональных покрытий, установок пожаротушения на основе генерации микродисперсного аэрозоля и газодисперсного синтеза нанодисперсных частиц оксидов и нитридов металлов. Практическое применение конверсии ракетных и реактивных двигателей изложено на примере реальных разработок.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; www.baumanpress.ru