

## ВЫБОР ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ СОЗДАНИЯ И МОДЕРНИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ

К.С. Павлов (ИПУ РАН, МФТИ), В.Н. Мелкишев (ИСА РАН),

Е.Н. Хоботов (ИПУ РАН, МГТУ им. Н.Э. Баумана)

*Рассматриваются существующие подходы, предназначенные для выбора оборудования производственных участков и систем на предприятиях машиностроения. Предложены алгоритмы выбора оборудования производственных систем и участков при их создании или модернизации, работающие на длительном временном интервале, позволяющем моделировать работу длинных по времени производственных заданий, а также обеспечивающие контроль работоспособности и эффективности работы создаваемых и модернизируемых систем или участков.*

*Ключевые слова: производственные системы, моделирование, технологический маршрут, выбор оборудования, теория расписаний.*

### Введение

Задачи проектирования и модернизации производственных систем вызывают все больший интерес, который обусловлен тем, что в последние годы заметно сокращается жизненный цикл производимой продукции, расширяется ее ассортимент и среди производителей усиливается конкурентная борьба. Это приводит к необходимости значительно чаще обновлять и совершенствовать производимую продукцию, что в свою очередь приводит к потребности создания новых и модернизации действующих производств.

Создание и модернизация производственных систем и участков без предварительного моделирования и тестирования представляется весьма рискованным делом, поскольку стоимость современного оборудования и его монтажа для таких систем является очень высокой, а устранение выявленных просчетов и ошибок в процессе работы неудачно спроектированных систем и участков может потребовать значительных дополнительных затрат.

В связи с этим в научной литературе уделяется повышенное внимание разработкам в этой области. В [1–2] рассматриваются методы формирования производственных систем и участков на основе создания производственных ячеек, на которые поступает поток деталей для обработки. Критерием формирования ячеек является минимизация времени транспортировок деталей между станками в создаваемых системах и участках. Однако предположение о возможности обработки поступающих деталей на небольшом числе типов оборудования, которое может быть объединено в производственные ячейки, является весьма специфичным и в очень многих случаях не выполняется. Другой подход заключается в выборе набора инструментов методами математического моделирования для заранее заданного числа станков [3]. В работах [4] предложен оптимизационно-имитационный подход, в котором рассматривается совместная работа оптимизационных и имитационных моделей. Ограничением данного подхода является возможность формирования схемы производственных участков и систем только на основе краткосрочных заданий (не более 1...2 мес.).

Кроме того, из-за высокой стоимости современного оборудования и его монтажа возникают проблемы, связанные с организацией и проведением проверок,

которые могли бы либо подтвердить работоспособность и оценить эффективность работы создаваемых или модернизируемых систем или участков, либо выявить недостатки или просчеты в их создании.

### Постановка задачи

В настоящей работе предложены алгоритмы выбора оборудования производственных систем и участков при их создании или модернизации, лишенные временных ограничений. Кроме того, предусматривается организация проверок работоспособности и эффективности работы создаваемых и модернизируемых систем или участков.

Для реализации математических алгоритмов предлагается разработать компьютерную систему определенной структуры, которая могла бы обеспечить выполнение указанных выше условий и требований.

### Алгоритмы выбора оборудования

Рассмотрим основные идеи и принципы создания моделей выбора оборудования для производственных систем и участков при их проектировании.

Для каждого производственного задания выбирается заведомо избыточное количество обрабатываемого оборудования используемых типов из множества доступного оборудования. Затем по результатам расчета модели из-за ограничений на стоимость оборудования системы производится проверка целесообразности включения в создаваемую систему каждой единицы оборудования, а также определяется необходимое количество комплектов технологической оснастки для обработки соответствующего задания.

Модель выбора оборудования строится на основе использования балансовых ограничений на время обработки деталей, входящих в состав производственного задания, и на время использования оборудования каждого типа. Балансовое ограничение на время использования  $l$ -го оборудования  $j$ -го типа имеет следующий вид:

$$\sum_{i \in I_j} \sum_{k \in \tilde{K}_{ij}} (\tilde{\theta}_{ij}^k n_i t_{ij}^k + \hat{\theta}_{ij}^k \tau_{ij}^k) \leq \tilde{y}_{jl} V_j \mu_j, \quad j = 1, \dots, m, \quad l = 1, \dots, M_j, \quad (1)$$

где  $I_j$  — множество типов деталей из производственной программы, которые обрабатываются на оборудовании  $j$ -го типа,  $\tilde{K}_{ij}$  — множество технологических маршрутов, по которым детали  $i$ -го типа из множества  $I_j$  могут быть

изготовлены на оборудовании  $j$ -го типа,  $\tilde{\theta}_{ij}^k$  — переменные  $\{0 \leq \tilde{\theta}_{ij}^k \leq 1\}$ ,  $n_i$  — размер партии деталей  $i$ -го типа ( $i = 1, \dots, L$ ),  $L$  — число типов деталей, которые могут входить в производственную программу создаваемой ПС,  $\hat{\theta}_{ij}^k$  — булевы переменные  $\{0, 1\}$ ,  $t_{ij}^k$  — время обработки детали  $i$ -го типа на оборудовании  $j$ -го типа по  $k$ -у технологическому маршруту,  $t_{ij}^k$  — время переналадки оборудования  $j$ -го типа для обработки детали  $i$ -го типа по  $k$ -у технологическому маршруту,  $\tilde{y}_{jl}$  — целочисленные переменные типа  $\{0, 1\}$ ,  $V_j$  — ресурс времени использования оборудования  $j$ -го типа в течение интервала времени  $T$ ,  $\mu_j$  — параметр, обозначающий загрузку оборудования  $j$ -го типа,  $m$  — число типов оборудования, которое может быть использовано для создания системы,  $M_j$  — число единиц оборудования  $j$ -го типа, которое может быть включено в создаваемую систему.

Величина  $\tilde{y}_{jl}$  равна единице, если  $l$ -е оборудование  $j$ -го типа включается в создаваемую систему, и нулю в противном случае. Величина  $\tilde{\theta}_{ij}^k n_i$  показывает, какая часть партии деталей  $i$ -го типа обрабатываются на  $l$ -м оборудовании  $j$ -го типа по  $k$ -у технологическому маршруту. Величина  $\hat{\theta}_{ij}^k$  равна 1, если детали  $i$ -го типа обрабатываются на  $l$ -м оборудовании  $j$ -го типа по  $k$ -у технологическому маршруту и нулю в противном случае.

Величина  $\sum_{l=1}^{M_j} \hat{\theta}_{ij}^k$  показывает, какое число единиц оборудования  $j$ -го типа потребуется переналаживать для обработки деталей  $i$ -го типа по  $k$ -у технологическому маршруту и какое число комплектов технологической оснастки потребуется для их обработки.

На переменные  $\hat{\theta}_{ij}^k$  и  $\tilde{\theta}_{ij}^k$  накладываются ограничения, которые определяются условиями и особенностями обработки деталей [5].

Оборудование создаваемой системы должно обеспечивать экономически эффективную обработку выбранной производственной программы, и прибыль, получаемая от обработки этой программы, должна быть не ниже заданной величины  $C_0$ . Поэтому в модель включается следующее ограничение:

$$\sum_{i=1}^L n_i \sum_{k=1}^{K_i} \theta_i^k (c_i - \tilde{c}_i^k) \geq C_0, \quad (2)$$

где  $c_i$  — доход, получаемый от обработки детали  $i$ -го типа,  $\tilde{c}_i^k$  — затраты на изготовление детали  $i$ -го типа по  $k$ -у технологическому маршруту.

Стоимость оборудования, включаемого в систему, не должна превышать средств  $D$ , выделенных на ее создание. Ограничение на стоимость оборудования имеет вид:

$$\sum_{j=1}^m \sum_{l=1}^{M_j} \left( d_j \tilde{y}_{jl} + \sum_{i \in I_j} \sum_{k \in K_{ij}} \tilde{b}_{ij}^k \hat{\theta}_{ij}^k \right) \leq D, \quad (3)$$

где  $d_j$  — стоимость единицы оборудования  $j$ -го типа,  $\tilde{b}_{ij}^k$  — стоимость разработки и изготовления одного комплекта технологической оснастки для обработки деталей  $i$ -го типа на оборудовании  $j$ -го типа по  $k$ -у технологическому маршруту.

Функционал, максимум которого определяется в данной модели, принимает вид:

$$J = \alpha_1 \sum_{i=1}^L n_i \sum_{k=1}^{K_i} \theta_i^k (c_i - \tilde{c}_i^k) - \alpha_2 \sum_{j=1}^m \sum_{l=1}^{M_j} b_j \tilde{y}_{jl} - \alpha_3 \sum_{j=1}^m \sum_{l=1}^{M_j} \sum_{k \in K_{ij}} \hat{b}_{ij}^k \hat{\theta}_{ij}^k, \quad (4)$$

где  $\alpha_i$  — весовые коэффициенты ( $i=1, 2, 3$ ),  $b_j$  — стоимость обслуживания, ремонтов и профилактических работ на оборудовании  $j$ -го типа в течение интервала времени  $T$ .

Здесь следует отметить, что более надежное и качественное оборудование, как правило, имеет большую стоимость  $d_j$ , больший ресурс времени использования  $V_j$  в течение интервала времени  $T$  и меньшую стоимость обслуживания, ремонтов и профилактических работ  $b_j$ .

Затем с использованием предлагаемой модели (1)-(4), расчеты которой сводятся к решению целочисленной задачи линейного программирования, лишнее оборудование из производственного участка исключается.

С использованием принципов и методов, изложенных в [5], работа предложенной модели может быть согласована с моделями и методами построения расписаний, что позволяет не только выбирать оборудование для создаваемых или модернизируемых участков, но и получать первую информацию о работоспособности такого участка.

Модель, позволяющая производить выбор оборудования для модернизации производственных систем, также строится в соответствии с описанной выше схемой, то есть сначала задается заведомо избыточное количество обрабатывающего оборудования каждого типа, которое целесообразно включить в модернизируемую систему. Задаваемое число избыточного оборудования включает как новое для системы оборудование, так и оборудование уже используемых в системе типов. Дополнительное оборудование уже используемых в системе типов приобретает обычно в случае расширения производства.

Затем производится проверка целесообразности исключения из модифицируемой системы ненужного оборудования и включения в нее недостающего оборудования, а также определяется необходимое число комплектов технологической оснастки, которая позволяет производить обработку обновленной производственной программы в заданные сроки.

Модель включения в модернизируемую систему или участок недостающего оборудования и исключения из нее ненужного оборудования также строится по описанной выше схеме, хотя входящие в модель ограничения и функционал несколько отличаются от приведенных выше.

### Принципы построения и структурная схема системы выбора оборудования

В процессе моделирования формируется достаточное число плановых заданий, в значительной степени зависящих от величины изменений в про-

изводственных заданиях (на месяц), которые входят в производственные программы (например годовые) создаваемых или модернизируемых систем и участков. Каждое сформированное задание должно быть рассчитано на выполнение в течение такого интервала времени, на котором описанные выше модели позволят эффективно выбирать оборудование, то есть на этом интервале времени задания должны отражать типовые условия или характерные особенности работы создаваемой системы или участка. Отдельно моделируется работа сложных и «неудобных» заданий.

Варируются в некотором диапазоне также и финансовые средства, выделяемые на создание системы или участка, поскольку заранее сложно обосновано оценить и выбрать их величину.

Затем для каждого сформированного задания с использованием моделей выбора оборудования строится схема производственной системы или участка и на их основе формируется некоторое множество схем системы или участка, из которых уже и производится выбор лучшей.

Для этого каждая схема производственной системы или участка из сформированного множества схем тестируется на единой производственной программе, которая должна по возможности наиболее полно отражать условия будущей работы системы на достаточно длительном промежутке времени, обычно годовом, а также сложные и «неудобные» для системы задания, которые вызывают особый интерес заказчиков.

По результатам тестирования собирается и анализируется информация о работе каждой схемы в течение исследуемого интервала времени. На основании работы схем и показателей их работы производится выбор лучшей.

Однако собранные показатели часто противоречат друг другу, и поэтому при выборе «лучшей» схемы приходится искать некоторый компромиссный вариант. Для поиска таких компромиссных вариантов в настоящее время разработано множество методов принятия решений. В данной работе для выбора «лучшей» схемы производственной системы или участка использовался метод линейной свертки критериев [6].

Для использования этого метода эксперты определяют важность каждой характеристики производственной системы/участка и ее влияние на выбор наиболее подходящей схемы системы или участка, а также коэффициенты, позволяющие привести различные по своей сущности характеристики системы или участка к единой системе измерения, например, денежной. На основе важности характеристик производственной системы или участка и коэффициентов, сводящих различные показатели к единой системе измерения, и формируются весовые коэффициенты для метода линейной свертки критериев.

*Павлов Константин Сергеевич – старший математик ИПУ РАН, аспирант МФТИ,*

*Мелкишев Виктор Николаевич – канд. физ.-мат. наук, старший научный работник Института системного анализа РАН,*

*Хоботов Евгений Николаевич – д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник ИПУ РАН, проф. кафедры РК9 МГТУ им. Н.Э. Баумана.*

*Контактный телефон (495)-334-87-71.*

*E-mail: konstantin.pavlov@phystech.edu*

### Результаты вычислительных экспериментов

Для реализации предложенных алгоритмов была разработана компьютерная система, с использованием которой было решено порядка 10 тестовых задач с реальными данными ряда машиностроительных предприятий. Проведенные вычислительные эксперименты показали достаточно высокую эффективность разработанной системы и предложенных моделей.

Результаты использования системы рассмотрим на примере решения задачи выбора обрабатывающего оборудования для производственного участка обработки корпусных деталей.

В задаче требовалось выбрать оборудование из 18 типов станков, которое следует включить в состав производственного участка, предназначенного для обработки деталей 42 различных типов. Для обработки детали каждого типа было задано 1...7 технологических маршрутов обработки. Каждый технологический маршрут содержал 3...10 операций. Время обработки одной детали варьировалось в диапазоне 60...200 мин., себестоимость производства — 200...600 руб., отпускные цены деталей — 500...1800 руб. Детали обрабатываются партиями по 50...400 ед. Были заданы ограничения на стоимость приобретаемого оборудования в 150 млн. руб.

Выбранный с использованием системы комплект оборудования для производственного участка имел стоимость в 126 млн. руб., прибыль в течение 1 мес. от работы предложенной производственной схемы составила 235 тыс. руб. Расчеты каждой из решаемых задач занимали 8...12 мин. на восьмиядерном процессоре с тактовой частотой 2 ГГц.

### Список литературы

1. *Jayaswal S., Adil G. K.* Efficient algorithm for cell formation with sequence data, machine replications and alternative process routings // International journal of production research. 2004. Т. 42. №.12. С. 2419-2433.
2. *Ouk Kim C., Baek J. G., Baek J. K.* A two-phase heuristic algorithm for cell formation problems considering alternative part routes and machine sequences // International Journal of Production Research. 2004. Т. 42. №. 18. С. 3911-3927.
3. *Jahromi M., Tavakkoli-Moghaddam R.* A novel 0-1 linear integer programming model for dynamic machine-tool selection and operation allocation in a flexible manufacturing system // Journal of Manufacturing Systems. 2012. Т. 31. -№. 2.- С. 224-231.
4. *Хоботов Е.Н.* Оптимизационно-имитационный подход к моделированию сложных систем. I и II // Изв. РАН. Теория и системы упр. 1996. № 1 и 2. С. 111-117 и 109-115.
5. *Хоботов Е.Н.* Использование оптимизационно-имитационного подхода для моделирования и проектирования производственных систем. I и II // АиТ. 1999. № 8 и 9 С. 163-176 и 154-161.
6. *Моисеев Н.Н.* Математические задачи системного анализа. М.: Наука. 1981.