

УДК 658.512

Разработка метода планирования производства ракетно - космической техники с включением коммерческих заказов

Марков Георгий Сергеевич

Ермолова Мария Алексеевна (*научный руководитель*)

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Представлен метод планирования работ на машиностроительном предприятии по производству ракетно-космической техники (шар-баллонов) с возможностью включения коммерческих заказов. Описаны технологический процесс изготовления шар-баллонов, анализ существующих подходов к решению задач теории расписаний, выбрано решение на основе метода теории ограничений (ТОС). Представлен алгоритм построения расписания с учетом контроля качества и программа, реализующая данный подход. Приведены результаты вычислительных экспериментов.

Ключевые слова: планирование расписания, коммерческий заказ, шар-баллон, машиностроительное предприятие, теория ограничений, программный код

Введение. Настоящая работа посвящена разработке метода планирования производства шар-баллонов для ракетно-космической техники с возможностью включения в расписание коммерческих заказов. Цель — улучшение экономических показателей предприятия за счет рационального использования простаивающих мощностей.

Шар-баллон представляет собой титановую герметичную емкость, используемую в ракетах «Протон», «Ангара» и др. В условиях отсутствия поставок с Украины, возникла необходимость организации собственного производства таких изделий на Воронежском механическом заводе.

Задача построения расписания включает:

- выполнение основного планового задания;
- интеграцию внешних заказов;
- учет контроля качества.

Для решения задачи использован подход на основе теории ограничений (ТОС), обеспечивающий оптимальное построение расписания при помощи анализа «узких мест» [1–5].

Методы решения задачи. Задача относится к классу задач теории расписаний без прерываний, где необходимо минимизировать общее время выполнения всех операций.

Изучены следующие подходы:

- метод ветвей и границ;
- динамическое программирование;
- эвристические и метаэвристические алгоритмы;
- теория ограничений (ТОС).

На основании анализа выбран метод ТОС, поскольку он позволяет эффективно строить расписания для реальных условий, ориентирован на выявление и устранение «узких мест» и обеспечивает высокую скорость работы.

Сформулируем постановку задачи. Пусть T — множество операций; M — множество станков; C_{max} — целевое значение (общее время расписания). Тогда задача может быть записана как

$$\min_t C_{max},$$

при условиях: для каждого $t \in T$ назначено на некоторый $m \in M$; на каждом $m \in M$ операции не пересекаются во времени.

Учет контроля качества. Контроль качества осуществляется после этапов обработки и сборки. Для оценки вероятности брака используется биномиальное распределение

$$P(k) = C_n^k p^k (1-p)^{n-k},$$

где n — количество деталей в партии; p — вероятность брака одной детали; k — число забракованных деталей. Каждая деталь проходит контроль, и в случае брака отправляется на повторную обработку. При этом контролируется также качество сборки готового изделия.

Программная реализация. Программа реализована на языке Python 3 с использованием библиотек `pandas`, `numpy`, `matplotlib`. Реализованы следующие модули: генерация исходных данных; построение локальных расписаний; построение каркасного расписания; визуализация расписаний с помощью диаграмм Ганта; статистика загрузки оборудования.

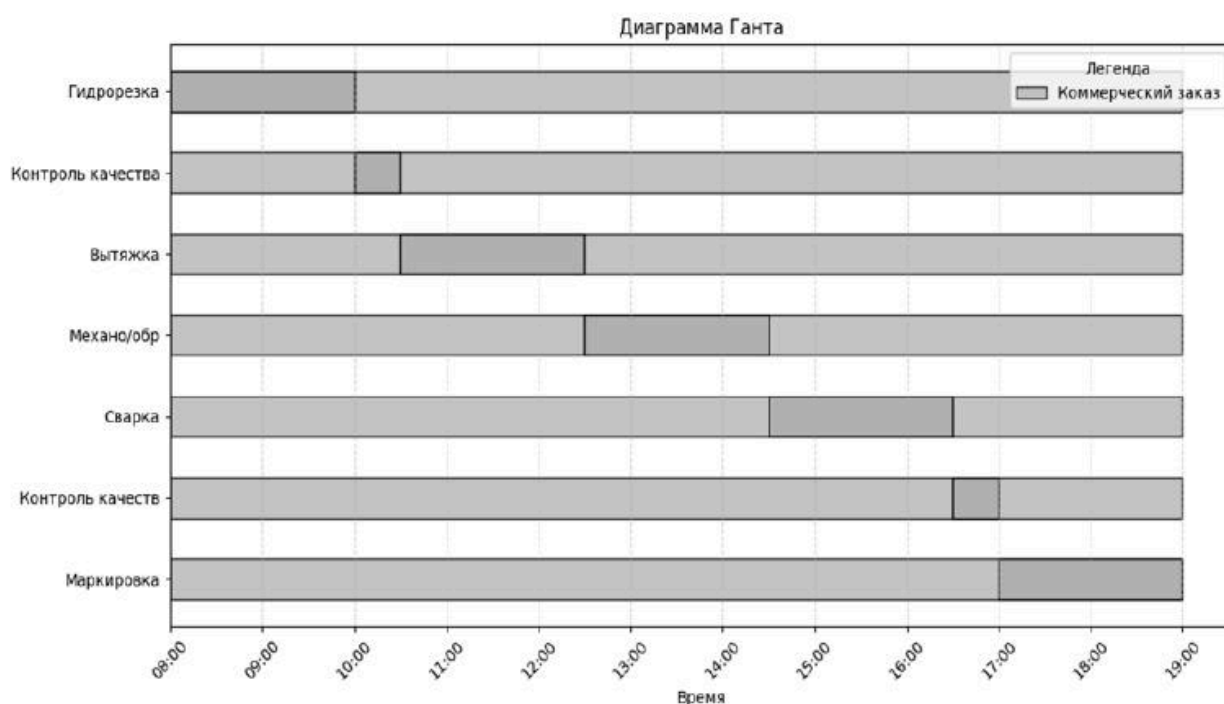


Диаграмма Ганта локального расписания с добавлением внешних заказов

С программой были проведены вычислительные эксперименты, подтверждающие работоспособность предложенных методов. Для проверки работы программного кода было смоделировано построение расписаний для небольшой партии шар-баллонов. Результат включения коммерческих заказов в программу предприятия представлен на рисунке.

Заключение. В результате работы был разработан метод планирования работ на машиностроительном предприятии с внедрением коммерческих заказов. Использован подход на основе теории ограничений, позволяющий эффективно строить расписание даже при наличии дефектов производства и необходимости дополнительного контроля.

Основные выводы:

- предложенный метод позволяет повысить экономическую эффективность за счет включения коммерческих заказов;
- учет брака и контроля качества значительно влияет на длительность расписания;
- программная реализация демонстрирует приемлемую скорость работы и корректность результатов.

Перспективы развития: расширение функционала программы на последовательные коммерческие заказы; интеграция с MES-системами; использование машинного обучения для прогноза брака.

Литература

- [1] Лазарев А.А., Гафаров Е.Р. *Теория расписаний, задачи и алгоритмы*. Москва, МГУ, 2011, 222 с.
- [2] Land A.H., Doig A.G. An automatic method of solving discrete programming problems. *Econometrica*, 1960, no. 3, pp. 497–520.
- [3] Беллман Р.Э. *Динамическое программирование*. Москва, Изд-во иностр. лит., 1960, 401 с.
- [4] Ермолова М.А. Система планирования работ для машиностроительного предприятия с конвейерной сборкой изделий. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2015, № 5, с. 79–85.
- [5] Хоботов Е.Н., Ермолова М.А., Дудников Е.Е. Построение расписаний транспортирования деталей между подразделениями машиностроительных предприятий. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2017, № 5, с. 72–78.

Development of a production planning method for rocket and space technology including commercial orders

Markov Georgiy Sergeevich

Ermolova Mariya Alexeevna (*scientific advisor*)

BMSTU, Moscow, Russia

In this paper, a method is presented for planning operations at a mechanical engineering enterprise that manufactures rocket-space equipment (balloon spheres), with the option to accommodate commercial orders. The technological process for producing balloon spheres is described, existing approaches to scheduling problems are analyzed, and a solution based on the Theory of Constraints (TOC) is chosen. An algorithm for building a schedule with integrated quality control is introduced, along with a software implementation of this approach. Computational experiment results are also provided.

Keywords: schedule planning, commercial order, balloon sphere, mechanical engineering enterprise, theory of constraints, program code