

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 303.732.3

DOI: 10.22213/2410-9304-2025-1-20-25

### Задача определения минимального времени выполнения производственного плана и оптимизация загрузки оборудования\*

Д. А. Айзенштат, аспирант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Д. Е. Докучаев, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

С. В. Смирнов, кандидат физико-математических наук, доцент,

ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Статья посвящена производственному планированию и методам, используемым при планировании. Для прогнозирования и определения сроков производства, выявления проблемных этапов производства и более эффективного распределения ресурсов используются сетевые модели, которые позволяют визуализировать отношения между ресурсами и временем на разных этапах производства с целью оптимизации производственных процессов. Рассматривается система оперативного планирования производства предприятия с заданной номенклатурой выпуска изделий. Анализируется концепция планирования ресурсов предприятия. При планировании ресурсов предприятия, получении главного производственного плана проводится его декомпозиция и вносятся изменения в график формирования заказов на исходные сырьевые ресурсы для дальнейшей оперативной корректировки главного производственного плана с учетом современных требований к скорости и точности определения потребностей в ресурсах производственными системами. В статье рассмотрены математические модели и алгоритмы контроля материальных потоков в производстве. Рассматривается задача определения потребности в ресурсах для исследованных производственных систем.

Математический подход состоит в использовании технологических соотношений, связывающих количество объектов производства до выполнения каждой из операций и после. Рассматриваются технологические операции при производстве, наглядно представлена сетевая модель, опирающаяся на известные величины даты и времени; требуется определить количество требуемого для реализации сырья и прочих ресурсов, рассчитать эти потребности по времени процесса в динамике, а также, при необходимости, оптимизировать процесс по заданному критерию. Для определения минимального времени используется некоторая система допущений. Представлена сетевая модель технологических операций и предложен вариант изменения последовательности выполнения операций для уменьшения времени изготовления комплектующих в заказе с сохранением непрерывности процесса производства. Выводы, полученные в ходе исследования, послужат основой для разработки информационной системы.

**Ключевые слова:** сетевое планирование, машиностроение, пищевая промышленность, методы управления, оптимизация загрузки оборудования

#### Введение

**Актуальность исследования.** Производственное планирование играет ключевую роль в обеспечении эффективности и конкурентоспособности предприятий различных секторов экономики. Быстро меняющиеся рыночные требования и сложные производственные процессы вносят повышенные требования к методам планирования. Именно поэтому сетевые модели становятся незаменимым инструментом для оптимизации производственных процессов [1, 2].

Сетевые модели позволяют наглядно представлять и анализировать взаимосвязи между различными этапами производства, ресурсами и временными ограничениями. С их помощью

можно более точно прогнозировать сроки выполнения работ, выявлять потенциальные узкие места и эффективно распределять ресурсы. Это, в свою очередь, способствует повышению общей производительности и снижению издержек.

Объектом исследования выступает система оперативного планирования производства предприятия с заданной номенклатурой выпуска изделий.

Предметом исследования являются математические модели и алгоритмы оптимизации загрузки оборудования при производстве различного вида продукции.

Концепция планирования ресурсов реализуется программными средствами класса MRP

© Айзенштат Д. А., Докучаев Д. Е., Смирнов С. В., 2025

\* Работа выполнена в рамках Программы развития научных и научно-педагогических кадров ИжГТУ имени М. Т. Калашникова (шифр ДДЕ-24) «Исследование методами системного анализа и разработка программно-инструментальных средств комплексной автоматизации технологических процессов производственно-технической системы». Приказ ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М. Т. Калашникова» от 27.12.2023 г. №1565.

(MRPII). Информационные системы данного класса, получив на входе главный производственный план, проводят его декомпозицию в график формирования заказов на исходные сырьевые ресурсы. Учитывая параметры неснижаемого складского остатка, график цен и логистических ограничений поставок на сырье, программный продукт в автоматическом режиме формирует план заказов, утверждаемый ответственным менеджером предприятия [3, 4].

Динамическое поведение рынков сырья, готовой продукции и резкие изменения ситуации на рынке труда приводят к необходимости оперативной корректировки главного производственного плана [5, 6]. Подобные корректировки приводят к отмене запланированных заданий (производственных операций) и высвобождению зарезервированных ресурсов и складских объемов [7, 8]. Высвободившиеся ресурсы обязательно должны быть отмечены в базе данных как доступные для резервирования в реализации главного производственного плана.

В современных производственных системах требования к скорости и точности определения потребностей в ресурсах постоянно растут, что актуализирует вопрос разработки более рациональных способов решения этой задачи.

### Математическая модель

Математический подход состоит в использовании технологических соотношений, связывающих количество объектов производства до выполнения каждой из операций и после. Формализованный технологический процесс содержит информацию о необходимости отдельных деталей в сборки, о нормах расхода сырья, логистические зависимости. Для составления сетевой модели технологического процесса производства изделий необходима следующая информация [9, 10]:

- номенклатура выпускаемых изделий;
- комплектующие детали изделий;
- технологические операции, которые проходит каждая деталь в процессе производства;
- оборудование, необходимое для обработки, сборки и производства деталей изделий;
- материалы, из которых изготавливаются комплектующие;
- нормы затрат времени, энергии и материала на производство каждой детали.

Выбрав в качестве примера производство нефтегазового оборудования [11, 12], можно определить номенклатуру выпускаемых изделий в виде перечня скважинных насосов, а при рассмотрении в качестве примера пищевого производства изделий – в виде перечня хлебобулочных

изделий [13, 14]. В случае производства скважинных насосов неполный список комплектующих будет состоять:

- из патрубка;
- клапана;
- крыльчатки;
- подшипника;
- уплотнителя;
- зажима;
- муфты;
- сальника;
- шайбы;
- прочего.

Каждая деталь проходит ряд технологических операций обработки перед сборкой готового изделия.

При производстве хлебобулочных изделий список ингредиентов включает в себя:

- воду;
- дрожжи хлебопекарные прессованные;
- заварку для хлеба;
- хлебную закваску;
- маргарин;
- масло растительное;
- муку высшего сорта;
- муку зерновую;
- муку пшеничную;
- муку ржаную обдирную;
- солод;
- соль поваренную пищевую;
- прочее.

Каждый ингредиент проходит ряд технологических операций обработки перед выпуском готового продукта.

Технологические операции для обработки различных комплектующих даже одного типа при условии большого парка свободного оборудования являются по сути своей параллельными, т. е. они могут осуществляться в одно и тоже время.

При изготовлении одной конкретной детали технологические операции являются последовательными, т. е. последующая операция не может начаться до тех пор, пока не завершилась предыдущая.

В общем случае при обработке целой партии деталей одного вида эти операции носят последовательно-параллельный характер, т. е. последующая операция начинается в момент, когда на предыдущей операции обработана некоторая начальная партия, необходимая для начала следующей операции.

В случае рассмотрения технологических операций – рубка листового металла, резка, гиб-

ка, сварка, окраска – их последовательность может иметь следующий вид (рис. 1).

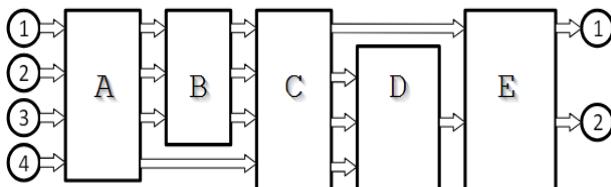


Рис. 1. Сетевая модель технологических операций

Fig. 1. Network model of technological operations

Интерпретация элементов представленной модели детально описана в таблице.

После обработки необходимой партии всех комплектующих одного вида изделия начинается сборка, которая является завершающим этапом производства изделия одного вида.

#### Интерпретация элементов модели

#### Interpretation of model elements

Позиции	
1, 2, 3, 4 слева	Поступления сырья в технологический процесс
1, 2 справа	Изготовленные детали
Переходы	
A	Рубка листового металла
B	Резка
C	Гибка
D	Сварка
E	Окраска детали

В случае пищевого производства последовательность операций на примере производства хлебобулочных изделий будет выглядеть следующим образом: *A* – просеивание муки, *B* – замешивание теста, *C* – формирование тестовой заготовки, *D* – расстойка тестовой заготовки, *E* – выпекание изделия.

В пищевом производстве переходы через операции, как правило, не допускаются. В этой связи операции *A–E* могут быть выполнены только последовательно.

При выполнении всей производственной программы или некоторого заказа, в соответствии с [15], производство насосного оборудования разных серий происходит последовательно, аналогично производство хлебобулочных изделий происходит также последовательно. Задача определения потребности в ресурсах для исследованных производственных систем наиболее часто возникает в следующей постановке.

Как правило, известной величиной является дата и время, в которое необходимо обеспечить наличие на выходе системы заданных производственной программой изделий. Требуется определить количество требуемого для реализации сырья и прочих ресурсов, рассчитать эти потребности по времени процесса в динамике, а также, при необходимости, оптимизировать процесс по заданному критерию.

При определении минимального времени выполнения производственного плана использовалась следующая система допущений:

- партии изделий различного типа изготавливаются последовательно;
- комплектующие изделия данного типа изготавливаются параллельно;
- процесс изготовления комплектующих изделий данного типа является непрерывным;
- промежуточные процессы, такие как транспортировка, упаковка, определяются как дополнительные операции;
- процесс сборки партии изделия данного типа начинается после изготовления всех комплектующих для партии изделий данного типа;
- процесс сборки партии изделий данного типа является непрерывным.

Сетевая модель загрузки оборудования при данных допущениях представлена на рис. 2.

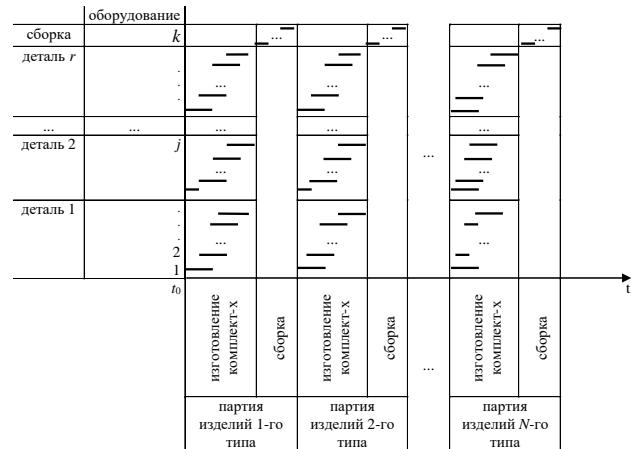


Рис. 2. Сетевая модель технологических операций

Fig. 2. Network model of technological operations

Сетевая модель, представленная на рис. 2, является простой для анализа, однако не оптимальной, поскольку существуют резервы для ее улучшения. Поэтому были внесены некоторые изменения, которые позволили уменьшить время выполнения плана.

Во-первых, сборку партии изделий одного типа можно осуществлять одновременно с изготовлением комплектующих для партии изделий

другого типа. При этом общее время выполнения плана можно будет сократить на время, равное сумме сборок партий изделий всех типов, кроме партии изделий последнего типа. Данное изменение может быть применимо к обоим типам рассматриваемых производств.

Во-вторых, существуют промежутки на каждом виде оборудования при изготовлении комплектующих выпускаемых изделий. Для каждого комплектующего был составлен свой набор оборудования, состоящий из тех видов оборудования, которые участвуют в процессе его производства. Если некоторый вид оборудования участвует в производстве более чем одного комплектующего, то общее количество данного вида оборудования было распределено пропорционально нормам времени при производстве этих комплектующих.

Суть изменений заключается в том, чтобы сдвинуть процесс производства каждого комплектующего партии изделий на максимально возможную величину. Таким образом, сократится время изготовления всех комплектующих данного типа в заказе, при этом останется непрерывным процесс производства внутри каждого типа изделий (см. рис. 3).



Рис. 3. Измененная схема последовательности изготовления комплектующих

Fig. 3. Modified component manufacturing sequence diagram

Таким образом, общее время выполнения плана будет равно сумме времени изготовления комплектующего с наибольшей продолжительностью изготовления для партий выпускаемых изделий всех типов и времени сборки партии изделий последнего типа.

#### Выводы и заключение

В данной работе рассмотрены сетевые модели загрузки оборудования при производстве скважинного оборудования и хлебобулочных изделий. Полученные результаты выступают теоретической базой для дальнейшей разработки информационной системы, позволяющей определять минимальное время выполнения производственного плана при заданных ограничениях на имеющееся оборудование.

#### Библиографические ссылки

1. Богданова А. А. Перспективы развития сетевого планирования в машиностроении // Экономика и бизнес: теория и практика. 2023. № 11-1 (105). С. 74–76. DOI 10.24412/2411-0450-2023-11-1-74-76. EDN CTLHWO.
2. Бурков В. Н., Буркова И. В., Засканов В. Г. Метод сетевого программирования в задачах календарного планирования // Автоматика и телемеханика. 2020. № 6. С. 17–28. DOI 10.31857/S0005231020060025. EDN QMIOLS.
3. Петрушевская А. А. Модель организации технологического процесса изготовления электроники с использованием принципов цифрового производства // Вопросы радиоэлектроники. 2019. № 1. С. 46–50. EDN YTNVRJ.
4. Костаков М. В. Возможности использования MRP-системы для управления запасами на предприятии // Научный аспект. 2018. Т. 1, № 2. С. 59–63.
5. Мизиковский И. Е. Мониторинг расхода материалов на производство продукции промышленными предприятиями // Учет. Анализ. Аудит. 2023. Т. 10, № 1. С. 55–63.
6. Боева Л. М., Коврижных О. А. Оперативная корректировка производственных планов с использованием технологий и алгоритмов гибких производственных систем // Экономика. Информатика. 2021. Т. 48, № 4. С. 802–809.
7. Сочнев А. Н. Планирование ресурсов производства на основе сетевых моделей // Управление большими системами : сборник трудов. 2020. № 86. С. 116–131. DOI 10.25728/ubs.2020.86.5. EDN JWIYWL.
8. Смольянинова Е. Н., Полищук Е. В. Проблема современной складской логистики в России // Азимут научных исследований: экономика и управление. 2019. Т. 8, № 2 (27). С. 292–294.
9. Титов В. В., Безмельницын Д. А. Организация управления сложным производством на основе моделей оперативно-календарного и сетевого планирования // Экономика. Профессия. Бизнес. 2020. № 2. С. 93–100. DOI 10.14258/epb201977. EDN TNPFRS.
10. Титов В. В., Безмельницын Д. А. Развитие систем оперативного управления на высокотехнологичных предприятиях машиностроения с длительным циклом производства // Бизнес. Образование. Право. 2021. № 3 (56). С. 210–216.
11. Айзенштат Д. А., Горохов М. М., Смирнов С. В. Постановка задачи оптимального выпуска продукции нефтяного машиностроения с учетом различных технологий и используемых материалов // Интеллектуальные системы в производстве. 2024. Т. 22, № 1. С. 28–33. DOI 10.22213/2410-9304-2024-1-28-33. EDN AHQXHX.
12. К вопросу об эффективности клапанных узлов скважинных штанговых насосов / Т. Р. Долов, А. В. Деговцов, И. Н. Герасимов, К. И. Клименко // Труды Российской государственной университета нефти и газа имени И. М. Губкина. – 2016. – № 1 (282). – С. 97–105.

13. Зимняков В. М. Состояние производства хлеба и хлебобулочных изделий в России // Инновационная техника и технология. 2022. Т. 9, № 4. С. 87–92.
14. Николаева В. С., Гордеева И. В. Системное описание процессов производства хлебобулочных изделий ОАО «Хлебокомбинат «Викингский» // Современные проблемы и пути их решения в науке, производстве и образовании. 2019. № 8. С. 118–121.
15. Тагирова К. Ф., Шалупов И. С Современные интеллектуальные информационные технологии в нефтяной промышленности // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2022. Т. 26, № 3 (97). С. 78–89. DOI 10.54708/19926502\_2022\_2639778. EDN ZNWPUM.
- References**
1. Bogdanova A.A. [Prospects for the development of network planning in mechanical engineering]. *Ekonomika i biznes: teoriya i praktika*. 2023. No. 11-1. Pp. 74-76 (in Russ.). DOI 10.24412/2411-0450-2023-11-1-74-76. EDN CTLHWO.
  2. Burkov V.N., Burkova I.V., Zaskanov V.G. [Network programming method in scheduling problems] *Avtomatika I telemekhanika*. 2020. No. 6. Pp. 17-28 (in Russ.). DOI 10.31857/S0005231020060025. EDN QMIO.
  3. Petrushevskaya A.A. [Model of the organization of the technological process of manufacturing electronics using the principles of digital production] *Voprosy radioelektroniki*. 2019. No. 1. Pp. 46-50 (in Russ.). EDN YTNVRJ.
  4. Kostakov M.V. [Possibilities of using MRP system for inventory management in the enterprise]. *Nauchnyi aspekt*. 2018. Vol. 1, no. 2. Pp. 59-63 (in Russ.).
  5. Mizikovskii I.E. [Monitoring the consumption of materials for the production of products by industrial enterprises]. *Uchet. Analiz. Audit*. 2023. Vol. 10, no. 1. Pp. 55-63 (in Russ.).
  6. Boeva L.M., Kovrizhnykh O.A. [Operational adjustment of production plans using technologies and algorithms of flexible manufacturing systems]. *Ekonomika. Informatika*. 2021. Vol. 48, no. 4. Pp. 802-809 (in Russ.).
  7. Sochnev A.N. [Production resource planning based on network models]. *Upravlenie bol'shimi sistemami: sbornik trudov*. 2020. No. 86. Pp. 116-131 (in Russ.). DOI 10.25728/ubs.2020.86.5. EDN JWYW.
  8. Smol'yaninova E.N., Polishchuk E.V. [The problem of modern warehouse logistics in Russia]. *Azimut nauchnykh issledovanii: ekonomika i upravlenie*. 2019. Vol. 8, no. 2. Pp. 292-294 (in Russ.).
  9. Titov V.V., Bezmel'nitsyn D.A [Organization of complex production management based on operational calendar and network planning models]. *Ekonomika. Professiya. Biznes*. 2020. No. 2. Pp. 93-100 (in Russ.). DOI 10.14258/epb201977. EDN TNPRFS.
  10. Titov V.V., Bezmel'nitsyn D.A. [Development of operational management systems at high-tech mechanical engineering enterprises with a long production cycle]. *Biznes. Obrazovanie. Pravo*. 2021. No. 3. Pp. 210-216 (in Russ.).
  11. Aizenshtat D.A., Gorokhov M.M., Smirnov S.V. [Setting the problem of optimal production of oil engineering products taking into account various technologies and materials used]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2024. Vol. 22, no. 1. Pp. 28-33 (in Russ.). DOI 10.22213/2410-9304-2024-1-28-33. EDN AHQXHX.
  12. Dolov T. R., Degovtsov A. V., Gerasimov I. N., Klimenko K. I. [On the issue of the efficiency of valve units of borehole sucker rod pumps]. *Trudy Rossiiskogo gosudarstvennogo universiteta nefti I gaza imeni I. M. Gubkina*. 2016. No. 1. Pp. 97-105 (in Russ.).
  13. Zimnyakov V.M. [The state of production of bread and bakery products in Russia]. *Innovatsionnaya tekhnika i tekhnologiya*. 2022. Vol. 9, no. 4. Pp. 87-92 (in Russ.).
  14. Nikolaeva V.S., Gordeeva I.V. [Systematic description of the production processes of bakery products of OJSC "Vikinsky Bread Factory"]. *Sovremennye problem i puti ikh resheniya v naуke, proizvodstve I obrazovanii*. 2019. No. 8. Pp. 118-121 (in Russ.).
  15. Tagirova K.F., Shalupov I.S [Modern intelligent information technologies in the oil industry]. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta*. 2022. Vol. 26, no. 3. Pp. 78-89 (in Russ.). DOI 10.54708/19926502\_2022\_2639778. EDN ZNWPUM.

\* \* \*

### The Problem of Meeting Production Targets at a Minimal Time and Workload Optimization

D. A. Aizenshtat, Post-graduate, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

D. E. Dokuchaev, Senior Lecturer, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

S. V. Smirnov, PhD of Physics and Mathematics, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

*The article is devoted to production planning and methods used in planning. To predict and determine production timing, identify problematic production stages and allocate resources more efficiently, network models are used to visualize the relationships between resources and time at different production stages in order to optimize production processes. The system of enterprise operational production planning with a given product range is considered. The concept of enterprise resource planning is considered.*

*When planning enterprise resources and the main production plan development, its decomposition is carried out and amendments are made to the schedule for order placement for initial raw materials so as to perform operational*

*adjustment of the main production plan, taking into account modern requirements for the speed and accuracy of resource need determination by production systems.*

*The article considers mathematical models and algorithms for material flow control in production. The problem of the resource need determination for the studied production systems is considered.*

**Keywords:** network planning, mechanical engineering, food industry, management methods, workload optimization.

Получено: 01.08.24

**Образец цитирования**

*Айзенштат Д. А., Докучаев Д. Е., Смирнов С. В. Задача определения минимального времени выполнения производственного плана и оптимизация загрузки оборудования // Интеллектуальные системы в производстве. 2025. Т. 23, № 1. С. 20–25. DOI: 10.22213/2410-9304-2025-1-20-25.*

**For Citation**

Aizenshtat D.A., Dokuchaev D.E., Smirnov S. V. [Topic modeling of a text document using the matrix of terms of the processed document]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2025, vol. 23, no. 1, pp. 20-25. DOI: 10.22213/2410-9304-2025-1-20-25.