

Тульский государственный университет  
Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева  
Российское химическое общество им. Д.И. Менделеева  
Тульское отделение Российского химического общества им. Д.И. Менделеева  
ТООО Научно-технический центр  
ООО «ТУЛЬСКИЙ ДНТ»

## **ПРИОРИТЕТНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ НАУКИ И ТЕХНОЛОГИЙ**

**ДОКЛАДЫ  
XXX МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ  
КОНФЕРЕНЦИИ**

Тула  
«Иновационные технологии»  
2022

УДК 61  
УДК 658.5  
УДК 67

ББК 91.9

**Приоритетные направления развития науки и технологий:**  
доклады XXX международной науч.-практич. конф.; под общ. ред. В.М. Панарина. – Тула: Инновационные технологии, 2022. – 234 с.

Рассмотрены теоретические и прикладные вопросы развития инновационной деятельности, науки и технологий. Изложены аспекты современных энергосберегающих и ресурсосберегающих производственных технологий, рационального природопользования и экологии. Рассмотрены вопросы разработки информационных и образовательных технологий для решения научных и прикладных задач.

Материал предназначен для научных сотрудников, инженерно-технических работников, студентов и аспирантов, занимающихся широким кругом современных проблем *развития науки и технологий*.

***Рецензенты:***

***Вольхин Сергей Николаевич***, доктор педагогических наук, профессор, ректор АНО ДПО «Академия профессионального развития»;

***Рылеева Евгения Михайловна***, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры охраны труда и окружающей среды ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет».

***Редакционная коллегия***

*Академик РАН В.П. Мешалкин; проф., д.т.н. В.М. Панарин; доц., д.т.н. А.А. Маслова; проф., д.т.н. Л.Э. Шейнкман, доц., к.т.н. А.Е. Коряков.*

*Техническая редакция Жукова Н.Н., Путилина Л.П.*

ISBN 978-5-6045071-8-6

© Авторы докладов, 2022

© Издательство «Инновационные технологии», 2022

# ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО КАЛЕНДАРНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ СИСТЕМЫ

О.Е. Шашихина, Т.Б. Чистякова

Санкт-Петербургский государственный технологический институт  
(технический университет),  
г. Санкт-Петербург

*Аннотация.* В статье рассматриваются вопросы актуальности разработки специализированной компьютерной системы, позволяющей на основе проблемно-ориентированных методов оптимизации автоматизировать процесс формирования оптимальных производственных расписаний и тем самым повысить эффективность процесса календарного планирования для различных гибких многоассортиментных производств. Предлагаемая компьютерная система обладает архитектурой и пользовательскими интерфейсами, функционально соответствующими требованиям производственного управленческого персонала и обеспечивающими возможность оперативной и эргономичной настройки на конкретное производство, ассортимент продукции и конфигурации оборудования.

Оптимизация процесса календарного планирования и составления производственных расписаний является основой для экономически и ресурсно эффективного функционирования современных многоассортиментных предприятий [1]. Поиск оптимальной последовательности изготовления заказов для составления производственного расписания является комбинаторной NP-трудной задачей большой размерности, требующей при её решении учёта различного ассортимента продукции и множества конфигураций производственных линий. Автоматизация решения таких задач характеризуется значительной вычислительной сложностью, обусловленной требуемой оперативностью получения решений, обеспечением возможности перепланирования и необходимостью осуществлять поиск оптимального решения в большом пространстве поиска на множестве допустимых решений за приемлемое время.

В настоящее время на рынке представлено достаточно большое количество разнообразных систем автоматизации производственного планирования, активно ведутся научные исследования, связанные с математическим и программным обеспечением подобных систем. Тем не менее, существующие программные решения обладают рядом ограничений по их применению.

Предлагаемая компьютерная система разработана для современных инновационных крупнотоннажных производств, характеризующихся множественностью и сложностью технологических связей, большим ассортиментом продукции, множеством видов и конфигураций оборудования [2, 3].

Изготовление продукции на предприятиях такого класса ведется на сложном оборудовании различных конфигураций (от 1 до 5 производственных линий). Оборудование является перенастраиваемым, производственные линии характеризуются многовариантностью работы по сырью, продукции и

производительности (среднее количество вариантов перенастроек  $>5$ ). Поскольку производства являются многоассортиментными (до 500 видов продукции в различных категориях), для перехода с изготовления одного типа продукции на другой требуется большое количество перенастроек оборудования.

В рамках планирования данного класса производств комбинаторная задача поиска оптимальной очередности изготовления заказов для составления календарного расписания является задачей большой размерности: в задаче планирования могут участвовать до 500 разнотипных производственных заказов, 1-5 производственные линии, возможное количество вариантов распределения  $N$  заказов по  $M$  производственным линиям:  $((N+M-1)!)/(M-1)!$ . К примеру, существует 39916800 вариантов решений распределения 10 заказов по 2 линиям. Поэтому актуальной является разработка специализированной гибкой проблемно-ориентированной компьютерной системы для автоматизации процесса производственного планирования.

В общем виде постановка задачи оптимального планирования производств формулируется следующим образом: для заданного вектора входных параметров  $X = (O, E, Pd)$  требуется найти такое значение вектора варьируемых параметров  $Q^{opt} = \{(j, \tau_{oi}, k, \tau_i) \mid j = 1, Me, k = 1, L, L \in N, i = 1, N\}$ , т.е. такое оптимальное размещение для  $N$  заказов на  $Me$  производственных линиях в рамках периода планирования  $[\tau_b, \tau_e]$ , которое обеспечит экстремум целевой функции:  $F \rightarrow \min (\max)$ , где  $O = \{O_i, i = 1, N\}$  – вектор описывающий множество заказов, которые необходимо распределить по производственным линиям;  $E = \{E_j, j = 1, Me\}$  – набор производственных линий (машин, агрегатов, рабочих центров и др.);  $Pd = (\tau_o, Y_{cr})$  – вектор, описывающий параметры планирования, где  $\tau_o = [\tau_b, \tau_e]$  – параметр, определяющий период планирования,  $\tau_b$  – дата начала периода планирования;  $\tau_e$  – дата окончания периода планирования;  $Y_{cr}$  – параметр, определяющий критерий оптимизации.

Вектором варьируемых параметров является  $Q = \{Q_i \mid Q = (j, \tau_{oi}, k, \tau_i) \mid j = 1, Me, k = 1, L, L \in N, i = 1, N\}$  – вектор, описывающий распределение заказов по производственным линиям,  $\tau_{oi} \in [\tau_b, \tau_e]$  – дата начала выполнения  $i$ -го заказа (включается в себя дату и время запуска заказа на производство),  $k = 1, L, L \in N$  – порядковый номер выполнения  $i$ -го заказа на  $j$ -ой линии в текущем расписании  $Q$ ,  $L$  – количество заказов, выполняемых на  $j$ -ой линии в расписании  $Q$ ,  $\tau_i$  – время выполнения  $i$ -го заказа.

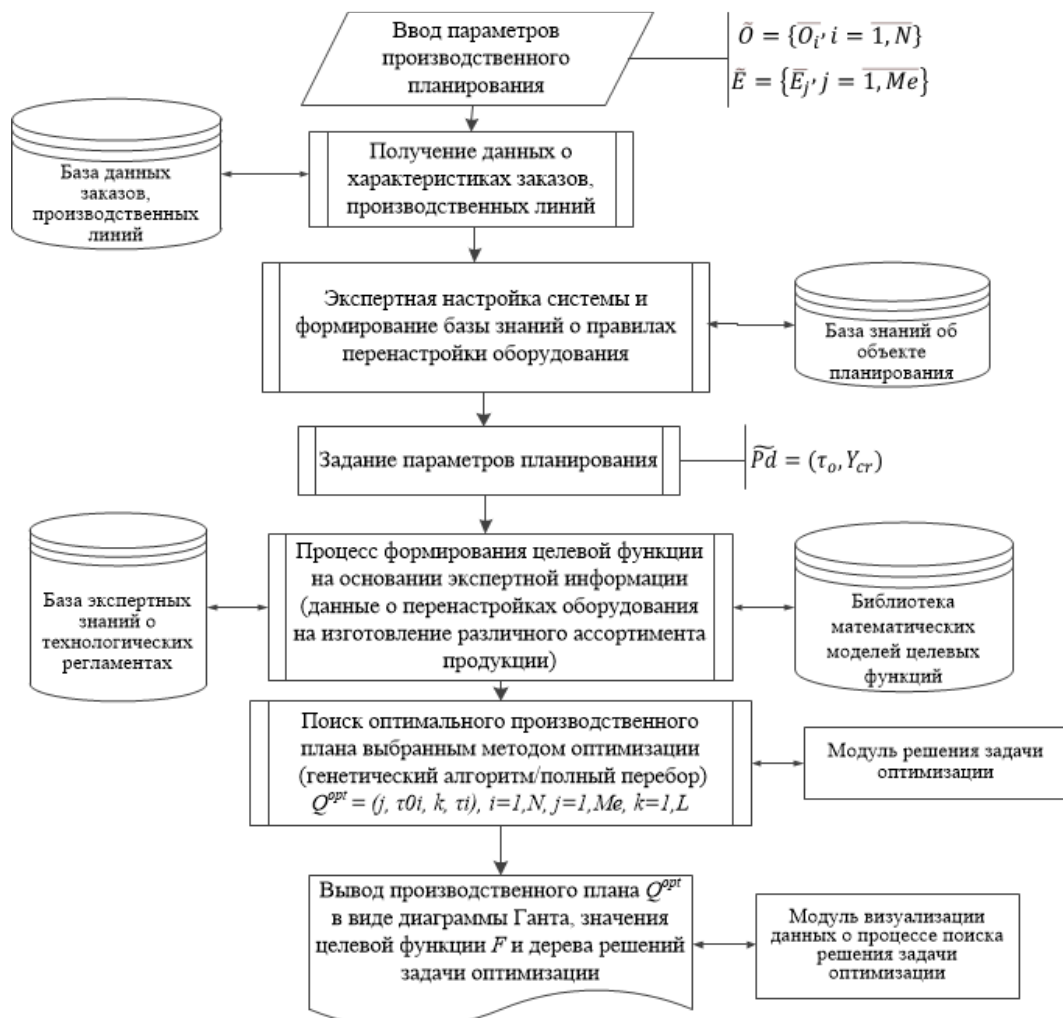
Отличительной особенностью предлагаемой системы является библиотека целевых функций задачи оптимизации. В системе заложена возможность оперативного формирования целевых функций исходя из экспертных знаний об объекте планирования. Далее в процессе постановки задачи календарного планирования пользователь может осуществлять выбор целевой функции для конкретной задачи, указывать диапазоны значений варьируемых параметров и задавать необходимую точность и погрешность решения.

Наиболее часто используемой целевой функцией при решении задач календарного планирования является суммарное время выполнения заказов:

$$F(\tau(Q^{opt})) = (\sum_{i=1}^L \tau_i) + \sum_{k=2}^L \tau(O_{i,k-1}, O_{i,k}) \rightarrow \min,$$

$\tau_i$  – время выполнения  $i$ -го заказа,  $\tau(O_{i,k-1}, O_{i,k})$  – время перенастройки оборудования с предыдущего заказа на текущий,  $k = 1, L, L \in N$ , – порядковый номер выполнения  $i$ -го заказа на  $j$ -ой линии в текущем расписании  $Q^{opt}$ ;  $j$  – номер линии, на которой выполняется заказ;  $L$  – количество заказов, выполняемых на  $j$ -ой линии в расписании  $Q^{opt}$ .

Предлагаемая компьютерная система автоматизации разработана в виде эргономичного десктопного приложения в интегрированной среде разработки Microsoft Visual Studio 2019 с использованием языка программирования C#. На рисунке 1 представлен алгоритм работы компьютерной системы.



Алгоритм работы системы производственного планирования

Пользовательские интерфейсы позволяют специалисту по планированию загружать данные в удобном ему формате и осуществлять выбор метода оптимального планирования в зависимости от размерности задачи. В ходе постановки задачи планирования производственный директор выбирает заказы, участвующие в планировании, производственные линии и задает период планирования. Далее из библиотеки производится выбор вида целевой функции. Решение задачи оптимизации и формирования производственных расписаний осуществляется с помощью математических моделей и программных реализаций

различных оптимизационных алгоритмов (метод полного перебора для задач малых размерностей, генетический алгоритм для задач больших размерностей).

Информационное обеспечение включает обновляемые и дополняемые базы данных. Для корректного формирования вида целевых функций используется экспертная информация о перенастройках оборудования с одного типа продукции на другой. Правила перенастройки представляются в виде производственной модели представления знаний, расчет времени перенастроек производится с помощью имплицативных высказываний.

Визуализацией производственного плана является диаграмма Ганта, дополнительно пользователю предоставляется объясняющая визуализация процесса поиска оптимального производственного плана, позволяющая проследить ход решения задачи оптимизации и улучшение значения целевой функции на различных итерациях поиска.

Для тестирования алгоритма оптимального планирования производств использовались данные заводов по производству полимерных материалов России и Германии. Всего предоставлены данные о 368 заказах, 2-х производственных линиях, 308 типах пленки. В использованном для тестирования производственном плане компании «Maria Soell HTF GmbH» участвуют 58 заказов, планирование производилось на 1,5 месяца. В результате тестирования, построенные с помощью компьютерной системы, производственные планы опережают план, построенный компанией, на 2-5 %, эффект снижения времени достигается за счет уменьшения времени перенастройки между заказами. Тестирование предлагаемой системы доказало эффективность и целесообразность её внедрения для решения задачи формирования оптимального производственного плана.

Открытая архитектура системы обеспечивает возможность расширения функциональности за счет настройки на новый тип производства и его характеристик, а также допускает возможность включения в систему новых методов оптимизации и подключения дополнительных программных модулей.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 21-79-30029).*

### **Список литературы**

1. Мешалкин В.П. Введение в инжиниринг энергоресурсосберегающих химико-технологических систем / В.П. Мешалкин. – М.: РХТУ им Д.И. Менделеева, 2020. – 212 с.

2. Комягина О.Ю. Программный комплекс для оптимального планирования производства многоассортиментных полимерных пленок / О.Ю. Комягина, Т.Б. Чистякова // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2012. – Т. 1, № 2(64). – С. 379-384.

3. Shashikhina O.E. Computer system for optimal planning of multi-assortment polymer films industrial production. / O.E Shashikhina., T.B. Chistyakova, Ch. Kohlert // Proceedings of the 2020 2nd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA 2020), Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2020. – P. 561–565.