

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ПОДХОДОВ К СОСТАВЛЕНИЮ РЕМОНТНЫХ РАСПИСАНИЙ НА ПРЕДПРИЯТИИ

Баженов Петр Алексеевич

Аспирант

ФГАОУ ВО «Пермский национальный
исследовательский политехнический университет»
pabazhenov@yahoo.com

ANALYSIS OF EXISTING APPROACHES TO COMPILING REPAIR SCHEDULE AT THE ENTERPRISE

P. Bazhenov

Summary. This article discusses network planning as a method of organizing work in enterprises. The statement of the problem of network planning is given, and the analysis of methods for solving this problem is carried out. Based on the results of a review of existing methods and approaches, it can be concluded that, at the moment, there is no such method for scheduling repair work and ore mining at a mining enterprise that would take into account the current state of equipment in the specifics of mine workings.

Keywords: repair scheduling, network planning, critical path, duration of work, heuristic methods, equipment condition.

Аннотация. В данной статье рассматривается сетевое планирование, как метод организации работ на предприятиях. Приведена постановка задачи сетевого планирования, а также проведен анализ методов решения данной задачи. По результатам обзора существующих методов и подходов можно сделать вывод, что, на данный момент, отсутствует такой метод календарного планирования ремонтных работ и работ по добыче руды на горнодобывающем предприятии, который бы учитывал текущее состояние оборудования в специфике горных выработок.

Ключевые слова: календарное планирование ремонтов, сетевое планирование, критический путь, продолжительность работ, эвристические методы, состояние оборудования.

Введение

В течение долгого времени, на предприятиях применяется система планово-предупредительных ремонтов (ППР), который подразумевает некий комплекс работ по техническому обслуживанию и ремонту оборудования в соответствии с установленными регламентами от производителя оборудования. Ремонт и техническое обслуживание проводится в такой системе, не смотря на их техническую необходимость и экономический эффект от последствий. При таком планировании не всегда удается учесть все взаимосвязи между единицами техники и производственными цепочками, в которых они участвуют.

В планировании выполнения комплексных работ, как правило, ставятся задачи минимизации времени проведения работ на обслуживающих устройствах или их стоимости. Решение таких задач, как прави-

ло, заключается в распределении типовых операций на обслуживающих устройствах, а также распределении непосредственно исполнителей по работам. Своевременное и эффективное планирование позволяет, в конечном итоге, повысить производительность труда.

Постановка задачи сетевого планирования

В общем случае сетевого планирования проблема расписаний имеет название *RCPSP (Resource-Constrained Project Scheduling Problem)* — задача построения расписания выполнения работ проекта с учетом отношений предшествования и ограничения на ресурсы. В такой задаче необходимо построить оптимальное расписание проекта с учетом сетевого графика (график взаимосвязей между работами) и с учетом ресурсов, доступных на проекте.

Рассмотрим математическую постановку такой задачи:

Есть некоторое количество работ N , а также некоторое количество ресурсов K .

$$N = \{1, \dots, n\} \quad (1)$$

$$K = \{1, \dots, k\} \quad (2)$$

Выполнение работ начинается в момент времени $t = 0$ и, для каждого момента времени t , известно некоторое количество единиц ресурса k Q_k . Для выполнения некоторой работы $i \in N$ требуется q_{ik} единиц ресурса $k \in K$. По окончании продолжительности такой работы $p_i \geq 0$ занятые ресурсы высвобождаются и могут быть снова назначены на выполнение других работ на приборе M_i .

Некоторые работы имеют ограничения предшествования: $i \rightarrow j$.

Также стоит отметить, что прерывание работ при выполнении, в классической постановке задачи *RCPSP*, запрещены.

Рассмотрим самую популярную целевую функцию такой задачи C_{max} : Исходя из вышеописанного, необходимо определить время начала выполнения требований S_i , таким образом, чтобы время выполнения всего проекта стремилось к минимуму:

$$C_{max} = \max_{i=1, \dots, n} \{C_i\}, C_{max} \rightarrow \min, \quad (3)$$

$$\text{где } C_i = S_i + p_i \quad (4)$$

При этом сохраняются следующие ограничения:

$$\sum_{i=1}^n q_{ik} \varphi_i(t) \leq Q_k, \quad (5)$$

При

$$\begin{cases} t \in [0, C_{max}], \\ \varphi_i(t) = 1, \text{ если работа } i \text{ выполняется в момент времени } t \\ \varphi_i(t) = 0, \text{ если работа } i \text{ не выполняется в момент времени } t \end{cases} \quad (6)$$

$$S_i + p_i \leq S_j, \text{ если } i \rightarrow j \text{ для } i, j \in N \quad (7)$$

Частным случаем задачи *RCPSP* является ряд задач для параллельных приборов (задачи *Job-Shop*, *Flow-shop*, *Open-shop*).

Структура работ для задачи *RCPSP* представляется сетевым графиком $G = (V, E)$, где V — вершины

ациклического орграфа, E — его дуги. Их можно выразить следующим образом:

$$V = \{1, \dots, n\} \quad (8)$$

$$E = \{(i, j) | i, j \in V; i \rightarrow j\} \quad (9)$$

В такой постановке $V = N$ — множество работ проекта, E — отношения между работами. Когда сетевой график не является ациклическим, допустимого решения не существует.

Также, как правило, при рассмотрении структуры проекта (совокупности работ) вводят две несуществующих работы с порядковым индексом 0 и $n+1$ соответственно. Продолжительность у таких работ приравнивается к 0 . Такие работы соединяются с остальными работами посредством задания отношений вида $0 \rightarrow j \rightarrow n+1, j = 1, \dots, n$. Затраты ресурсов у таких работ так же приравниваются к 0 .

Рассмотрим типовые расписания, которые могут применяться на производстве. Такие расписания так или иначе можно свести к задаче *RCPSP*:

- ◆ Расписание сотрудников. На каждом предприятии ставится задача распределения сотрудникам выполнения некоторого перечня ежедневных работ с учетом характеристик сотрудников. От качества такого расписания может зависеть эффективность работы сотрудников, рациональное использование интеллектуальных и материальных средств предприятия. Постановка задачи составления такого расписания может быть сведена к задаче цеха (*Shop Scheduling*) или временным таблицам.
- ◆ Производственное расписание. В промышленности предполагается наличие процессов, в которых очередность выполнения операций строго фиксирована. Такой тип расписаний, как правило, ставит перед собой цель эффективно распределить работы в этих процессах по времени на множестве устройств с целью минимизировать временные или материальные затраты. Постановка задачи составления такого расписания называется задачей *Job-shop* (частный случай задачи цеха).
- ◆ Транспортное расписание. На крупных предприятиях, обладающих большой территорией, как правило, возникает вопрос доставки сотрудников на рабочие места с помощью собственного транспорта на территории предприятия. Составление транспортного расписания несет в себе цель снизить время доставки сотрудников до рабочих мест, очередей на транспорт, повысить комфортность перевозки сотрудников. Для

моделирования такого рода систем применяется аппарат графов и сетей.

Методы решения задачи сетевого планирования

К методам решения задач составления расписания можно отнести [1]:

- ◆ Набор эвристических методов;
- ◆ Методы случайного поиска;
- ◆ Комбинаторные методы;
- ◆ Математическое программирование;

Некоторые из задач большой размерности нельзя реализовать методами полного перебора для получения точного решения характеризуемыми большой вычислительной сложностью и, как следствие, долгим сроком выполнения. Многочисленные эксперименты и исследования показали, что наиболее эффективными способами решения таких задач являются алгоритмы, в которых задача планирования решается многократно и окончательное решение формируется постепенно с использованием полученных ранее результатов и применяется рандомизация и подходы на основе механизмов, используемых природой. Как правило, на практике используют эвристические методы оптимизации.

Среди эвристических методов выделяют:

1. Конструктивные эвристические методы
2. Улучшающие эвристические методы
3. Метаэвристические методы

Конструктивные эвристические методы позволяют построить допустимое расписание. Улучшающие эвристические методы улучшают существующее расписание, однако не всегда это можно сделать. С помощью метаэвристических методов можно приблизить улучшенное расписание к оптимальному. Эвристические алгоритмы часто являются эффективными при применении их в задачах, когда поиск наилучшего решения затруднен или невозможен. Такой задачей является *NP*-трудная задача *RCPSP*. Использование эвристических алгоритмов помогает лишь приблизиться к окончательному решению, т.е. найти локальный экстремум.

К таким методам относят алгоритм Дейкстры, поиск с запретами, моделируемый отжиг, метод муравьиной колонии, генетические алгоритмы и т.п. алгоритмы.

Конструктивные эвристические методы

Такие методы состоят из правила приоритета работ, схемы формирования расписания и направления

формирования расписания. Правила приоритета работ задают приоритет одних работ над другими, в случае если есть конфликт по ресурсам. Схема формирования расписания задает подход по формированию расписания. Из подходов выделяют:

- ◆ Отталкиваясь от приоритета, брать работы последовательно и ставить их в расписание как можно раньше, учитывая все ограничения.
- ◆ Двигаться по дням выполнения проекта и загружать все доступные ресурсы по максимуму.

Многие исследователи пытались оценить эффективность применения тех или иных правил приоритета для решения задачи *RCPSP*. В исследованиях лидируют гибридные правила, а также метод критического пути.

Наиболее известным и простым алгоритмом приближенного решения задач *RCPSP* является алгоритм последовательной диспетчеризации. Данный жадный алгоритм за фиксированное количество шагов позволяет построить согласованное расписание или убедиться в его отсутствии, если есть неразрешимые ограничения.

Реализация такого алгоритма с использованием метода Муравьиные Колонии приведена в работе [2]. Так же в работе [3] приведена реализация алгоритма *LS* по схеме обратного прохода.

Данный алгоритм может быть улучшен с помощью применения метода Ветвей и Границ. Ветвление в таком алгоритме будет происходить при выборе работы *i*. Для такого алгоритма необходимо нахождение хороших верхних и нижних оценок. Решение с применением данного подхода приведено в исследовании [4]. В работе [5] приведен вариант решения задачи планирования гибридным алгоритмом с использованием метода ветвей и границ и генетического алгоритма.

На практике задача *RCPSP* разнится с математической моделью рядом существенных отличий. К таким отличиям можно отнести следующие:

- ◆ Тип работы. Выделяют классический тип, Контрольное событие, Гамак. Контрольное событие — классический тип работы с нулевой продолжительностью. Гамак — тип работы, когда работа выполняется только между началом и окончанием работ-соседей в цепи отношений. Продолжительность такой работы не фиксирована. Так же выделяют составные работы.
- ◆ Продолжительность общих работ. Выражается в днях, часах. Как правило, планирование редко ведется в единицах времени меньше указанных.
- ◆ Ресурсы. Они могут быть невозобновимыми, ограничено-возобновимыми, частично возобновимыми, логистическими, непрерывно разделяе-

мыми, исключительными, ресурсами с переменной доступностью. Возобновимые, как правило, это персонал и техника. Возобновимые ресурсы могут объединяться в бригады. Ресурсы могут зависеть от времени.

- ◆ График работы. Работы могут выполняться с разным графиком работы. В рамках проектной деятельности, как правило, выполнение и планирование осуществляется на основе календарей. Работам может быть установлены даты начала и завершения, вне зависимости от возможности выполнить ее раньше или позже.
- ◆ Характеристика связей работ. Связи между работами могут отличаться от классической постановки. Например, между окончанием работы-предшественника и началом работы-последователя может существовать задержка по времени. Величины задержек могут быть отрицательными. Работы так же могут формировать отношения предшествования как между работами, так и между событиями, связанными с их стартом и окончанием. Взаимосвязи работы могут формироваться так же и для составных работ.
- ◆ Целевые функции. Допускается выбор альтернативных функций для минимизации временных показателей, затрат на ресурсы, стоимости проекта обеспечения устойчивости расписания к задержкам, достижения многокритериальных показателей проекта и т.д.
- ◆ Задача может решаться в постановке скорректировать расписание с учетом измененных условий исходной задачи или при актуализации данных в реальном времени.

Существует расширенная модель классической постановки задачи RCPSP, соответствующая всем требованиям прикладных постановок, описанных выше. Такая модель была описана в данной работе [6]. В этой работе так же приведен алгоритм решения данной постановки, базирующийся на схеме последовательной диспетчеризации и учитывающий составные работы, ресурсные ограничения с переменным профилем использования (и возобновимые и невозобновимые), ограничения по времени (ограничения, связанные с календарным графиком).

Из решений, направленных на минимизацию проста оборудования с учетом пространственных факторов, можно выделить следующую работу [7]. Данная работа примечательна подходом учета пространственных факторов, поскольку данный подход актуален в подземных шахтных выработках из-за недостатка пространства для свободного передвижения транспорта.

Из решений задачи RCPSP, направленное на планирование ремонтов, можно выделить работу [8], в ко-

торой приводится метод решения задачи календарного планирования ремонтов технологического оборудования предприятия с использованием генетического алгоритма. Решение примечательно двухэтапным подходом к реализации, однако не подходит к календарному планированию ремонтов по текущему состоянию оборудования, поскольку не учитывает его фактическое состояние в момент планирования.

Также стоит выделить работу [9], которая предлагает модель построения согласованного расписания для выполнения комплексных работ. В данном исследовании приводится трехэтапный алгоритм, на первом шаге которого, отдельные множества работ (комплексы) агрегируют в общий сетевой граф, построенный на критических путях комплексов работ. Во втором шаге общий сетевой граф упорядочивают и по нему строят согласованный план выполнения всех работ проекта. Данная работа хорошо подходит для планирования производственных цепочек работ, однако не учитывает фактическое состояние оборудования, что является критичным параметром при выборе метода.

В работе [10] описывается подход к календарному планированию технического обслуживания и ремонта технологического оборудования авторемонтных предприятий. Данная работа опирается на методологию ППР при календарном планировании. Такой подход не применим к календарному планированию с учетом состояния оборудования, поскольку не опирается на фактическое состояние оборудования при планировании. Так же стоит выделить работу [11], в которой описывается подход к планированию ремонтно-строительных работ зданий и сооружений посредством прогнозирования физического износа конструктивных элементов. Данный подход основывается на планировании ремонтов по техническому состоянию, однако он не применим, в связи со спецификой, к горнодобывающей отрасли в части планирования ремонтов проходческого оборудования. Особое внимание можно уделить работе [12], в которой описывается подход к составлению и корректировке графика ремонтных работ на предприятии с учетом текущего технического состояния оборудования в производственных цепочках на предприятиях химической промышленности. Такой подход к календарному планированию не полностью применим к горнодобывающей отрасли, поскольку не учитывает специфику оценки технического состояния горнодобывающего оборудования, проходческих комбайнов, в частности.

Заключение

Исходя из обзора уже существующих методов и подходов можно сделать вывод, что, на данный момент,

отсутствует такой метод календарного планирования ремонтных работ и работ по добыче руды на горнодобывающем предприятии, который бы учитывал теку-

щее состояние оборудования в специфике горных выработок (оценка технического состояния проходческих комбайнов и планирование с учетом этой оценки).

ЛИТЕРАТУРА

1. Матренин П.В. Обзор методов оптимизации в комбинаторных задачах класса Job-Shop Scheduling // сборник научных трудов НГТУ.— 2014.— С. 113–124.
2. Лазарев А.А., Гафаров Е.Р. Теория расписаний. Задачи и алгоритмы. М.: МГУ, 2011.— 224 с.
3. Авдеенко Т.В., Петров Р.В. О возможностях применения методов и моделей теории расписаний для оптимизации работы веб-студии // Сборник научных трудов НГТУ.— 2016 -. № 2(84).— С. 7–20.
4. Григорьева Наталья Сергеевна Алгоритм ветвей и границ для задачи составления расписания на параллельных процессорах // Вестник СПбГУ. Серия 10. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. 2009. № 1.
5. Е.А. Кумагина, Е.А. Неймарк Разработка гибридного алгоритма решения задачи упорядочения // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2019. № 3 (126).
6. Аничкин А.С., Семенов В.А. Математическая формализация задач проектного планирования в расширенной постановке // Труды ИСП РАН. 2017. № 2.
7. Семенов В.А., Аничкин А.С., Морозов С.В., Тарлапан О.А., Золотов В.А. Комплексный метод составления расписаний для сложных промышленных программ с учетом пространственно-временных ограничений // Труды ИСП РАН. 2014. № 1.
8. Мышенков К.С., Романов А.Ю. Метод решения задачи календарного планирования ремонтов технологического оборудования предприятия с использованием генетического алгоритма // Машиностроение и компьютерные технологии. 2011. № 9.
9. Павлов А.А., Чернов С.К., Мисюра О.Б. Модели и алгоритмы теории расписаний в задачах планирования и управления проектами // Труды Одесского политехнического университета.— 2006.— Вып. 1 (25).— С. 150–159.
10. Планирование технического обслуживания и ремонта технологического оборудования авторемонтных предприятий / В.С. Ивашко [и др.] // Изобретатель.— 2014.— № 2.— С. 42–46.
11. Попова О.Н. Календарное планирование ремонтно-строительных работ на основе технологии поэтапной эксплуатации методами динамического программирования физического износа // Современные проблемы науки и образования.— 2014.— № 1.
12. Плехов П.А. Оптимальное управление циклами состояния оборудования промышленного предприятия: дис. канд. техн. наук: 05.13.06.— Пермь, 2011.— 158 с.

© Баженов Петр Алексеевич (pabazhenov@yahoo.com).

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»