

АЛГОРИТМ ПОИСКА РЕШЕНИЙ ЗАДАЧ НЕПРЕРЫВНОГО КАЛЕНДАРНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ

Калянов Г.Н. , Институт проблем управления РАН, Москва, *kalyanov@ipu.ru*
Титов Н.Н. , ООО «НВП МОДЕМ», Москва, *nntitov@nvp-modem.ru*
Шибeko В.Н., Гомельский государственный технический университет имени П.О.
Сухого, г. Гомель, Республика Беларусь, *svn20070809@gmail.com*

АННОТАЦИЯ: В статье рассмотрены вопросы экономико-математического обеспечения задач непрерывного календарного планирования. Предложен унифицированный для многих приложений 2-х этапный алгоритм линейного поиска наилучших вариантов планирования, основанный на учете многообразия факторов оптимизации. На простом примере продемонстрирована практическая эффективность метода при формировании календарного плана работ.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: математическое обеспечение, непрерывное календарное планирование, оптимизация распределения ресурсов.

Календарное планирование в интересах крупной производственной компании – это разработка для структурных подразделений (или подрядчиков) плановых заданий и обеспечение их необходимыми ресурсами. Одним из основных ресурсов планирования является экономико-математическое обеспечение, которому, в отличие от информационного обеспечения, не уделяется должного внимания в бизнес-процессах планирования. Существуют практические принципы календарного планирования, такие как: обеспечение равномерной по времени нагрузки на исполнителей и технические средства, формирование резерва времени на неблагоприятные события, ключевые мероприятия плана не должны приходиться на малые промежутки времени и т.п. Формализация подобных принципов вызывает математические трудности в постановках задач календарного планирования. Оптимизация очередности выполнения плановых операций сталкивается с гигантским количеством возможных вариантов расписания работ и необходимостью учета многих факторов, включая экономические. Сформировать единственный уникальный календарный план работ, который удовлетворял по всем параметрам всех участников производственного процесса, является труднорешаемой задачей. Необходимо разработать инструменты

(алгоритмы) поддержки принятия решений в календарном планировании, основываясь на адекватных модельных представлениях.

Существующие программные продукты типа **Microsoft Project** или системы **ORTEMS** в основном ориентированы на производственное планирование и малопригодны для решения масштабных задач календарного планирования методами комбинаторной оптимизации.

Непрерывный характер многих современных производственных процессов требует непрерывного календарного планирования (НКП). Базовая модель непрерывного календарного планирования, основана на мультипликативной модели времени выполнения работ и учете основных принципов планирования. Цель НКП: сформировать согласованное расписание выполнения всех запланированных работ $\{N\}$ различной сложности, с обеспечением полной и эффективной занятости всех M - бригад, а также сбалансированного использования выделенных технических средств (станков). Для построения календарного плана работ необходимо управлять переброской станков на объекты выполнения работ. Пусть задана матрица достижимости D , элементы которой соответствуют оценкам минимального времени выполнения всего комплекса обеспечивающих работ по переброске станков между объектами. Каждая работа территориально привязана к конкретному объекту.

Модель НКП весьма универсальна и адаптируется для многих приложений, в том числе:

- Массовое строительство распределенных объектов
- Проведение плановых дорожных ремонтов с привлечением соответствующих ресурсов
- Организация перевозок транспортной компанией и т.п.

Побуждающим мотивом исследования данного типа задач явилась ситуация с календарным планированием работ в крупных буровых компаниях, осуществляющих массовое строительство скважин [1].

В настоящее время на практике используются методы «ручного» календарного планирования, основанные на эмпирических правилах составления расписания работ. Подобный подход приводит к неэффективным вариантам распределения выделяемых ресурсов и не решает основную функциональную задачу: поддержка принятия оптимальных решений при формировании календарного плана работ. Современные вычислительные средства (многопроцессорные высокопроизводительные компьютеры, их программное и математическое обеспечение) значительно расширили область практического решения комбинаторных задач полного перебора за разумное время расчетов. Если исходные данные и трудовые ресурсы планирования сильно вариативны, то из всего многообразия возможных расписаний организации работ только сравнительно небольшая часть заслуживает внимания. Этот факт позволяет сосредоточить вычислительные ресурсы на наиболее перспективных подходах к формированию календарных планов работ. Сформулировать

единый критерий эффективности (оптимальности) календарного планирования для данной предметной области не представляется возможным, что не позволяет напрямую сравнивать различные варианты планирования. Возникает задача поиска альтернативных эффективных решений (вариантов) с последующим анализом полученных результатов.

Анализируя процессы формирования непрерывных календарных планов, можно выделить два последовательных этапа. В начале решается задача распределения новых работ между исполнителями. Принципиально важно контролировать время выполнения всех работ и обеспеченность производственного процесса трудовыми ресурсами (бригадами). Данная задача («первая оптимизационная») должна решаться в предположении постоянной занятости всех бригад. Фактически необходимо убедиться, что запланированных трудовых ресурсов (M) достаточно для выполнения плана и предложить неупорядоченное расписание выполнения работ, под которым понимается разбиение множества $\{N\}$ на M непересекающихся подмножеств N_1, N_2, \dots, N_M .

На первом этапе планирования целесообразно отбирать не только единственное оптимальное решение (по некоторому многопараметрическому критерию), но и ряд близких альтернативных решений. Такой подход обусловлен с одной стороны неоднозначностью восприятия интегральных показателей отдельных решений, с другой стороны рисками «потерять» наилучшее конечное решение. Отметим, что отбор альтернативных решений просто реализуется в алгоритмах полного (линейного) перебора. Кроме того, полный перебор позволяет одновременно проверять несколько критериев оптимальности, что существенно расширяет возможности процесса планирования.

Календарное планирование подразумевает скорейшее выполнение планового задания с использованием всех бригад. Этому требованию соответствует задача нахождения оптимального по быстродействию расписания, т.е. расписания минимальной длины.

Системный анализ ресурсной постановки задачи непрерывного календарного планирования показывает наличие большой зоны пересечения с хорошо исследованными общими задачами оптимизации многопроцессорных вычислений [2]. Известно, что данная задача является NP-трудной в сильном смысле и все известные точные алгоритмы их решения имеют переборный характер, а точных полиномиальных (эффективных) алгоритмов в настоящее время не известно [3].

Вместо суммы времен выполнения работ экономически целесообразно анализировать среднюю взвешенную временную сумму \bar{T}_Σ , которая характеризует финансовые затраты на оплату услуг бригады и по сути является аналогом среднего количества «трудодней».

Оптимальное по критерию быстродействия распределение работ (T_{onm}) обеспечивает предельно равномерную загрузку всех бригад, однако соответствующее значение \bar{T}_Σ может быть экономически не совсем

приемлемым. Отбор альтернативных вариантов «неупорядоченных расписаний» проводится для минимальных значений суммы двух показателей эффективности: $T_{план} = \max_{1 \leq j \leq M} R_j$ и \tilde{T}_Σ . При отборе следующих альтернатив учитывается наличие в расписании отличия более, чем на одну работу. Альтернативные расписания допускают небольшое увеличение $T_{план}$ относительно $T_{опт}$, но при этом обеспечивается более низкие значения \tilde{T}_Σ .

Второй этап раздельного планирования заключается в формирование «фиксированного» расписания, обеспечивающего минимальную техническую загрузку календарного плана работ. По сути, решается задача упорядочивания выполнения всех работ с учетом начальных условий и своевременного обеспечения необходимыми станками. Учет взаимного расположения объектов планирования и необходимого времени на переброску станков, приводит к тому, что многие варианты не согласуются с анализируемыми расписаниями. Оставшиеся варианты распределения станков по работам приводят к различным уровням суммарных издержек. Поэтому, как и в случае первой оптимизационной задачи, необходимо учитывать альтернативные варианты упорядоченных расписаний и соответствующие эффективные варианты расстановки станков. Таким образом, имеем многоальтернативное дерево решений, соответствующее формируемому календарному плану работ.

Рассмотрим алгоритм поиска эффективных решений второй оптимизационной задачи. В согласованном упорядочивании расписаний работ и управлением «движением» станков заложены большие резервы в снижении издержек и рисков. Общепринятым показателем эффективности планирования является минимизация суммарного времени перемещения станков для обеспечения выполнения плана. Другой характеристикой планирования является обеспечение равномерной нагрузки на все станки. Этот фактор особо значим в случае сильной избыточности парка станков, что может приводить к эксплуатации одних и тех же БУ. Однако, условие минимизации общего числа станков ($K = K_{\min} > M$), нивелирует данный фактор, увеличивает нагрузку на все станки и определяет новый показатель эффективности, связанный с уменьшением временных рисков выполнения всего объема работ по переброске станков. Каждая плановая переброска станков имеет временной резерв на выполнение данной операции $Z_i, i = 1, 2, \dots, N$. Обозначим $\Delta Z = \min_{1 \leq i \leq N} Z_i$ - минимальный резерв времени. Чем больше минимальный временной резерв для упорядоченного расписания работ, тем меньше риски, связанные с задержкой не только операций по переброске, но и основных работ, выполняемых бригадами.

Учет технического ресурса планирования приводит к увеличению вариативности решения комбинаторных задач данного типа и тем самым уменьшает зону применимости полного перебора. Кроме того, в зону

анализа попадают все альтернативные «неупорядоченные расписания». Полный перебор можно заменить двухшаговой последовательной процедурой поиска эффективных решений. Сначала организовать полный перебор упорядоченных расписаний с применением приближенного (эвристического) метода выбора станков. Понятно, что, рассматривая для планируемой работы единственный «свободный» станок, мы рискуем принять далеко не лучшее решение, последствия которого, могут сказаться позднее. Поэтому на втором шаге целесообразно для эффективных решений уточнить расстановку станков, используя разумный полный перебор. В данном случае, целесообразно организовать неявный перебор, только для всех «свободных» станков, используя метод ветвей и границ [4].

Каждое отобранное расписание (вариант эффективного календарного плана работ) имеет 4 интегральных показателя:

- время выполнения плана $T_{план}$
- среднее количество «трудодней» \bar{T}_{Σ}
- суммарное время перемещения станков $T_{пер}^{\Sigma}$
- минимальный резерв времени на операции по переброске станков ΔZ .

Пример отработки алгоритма поиска эффективных решений задачи календарного планирования строительства скважин

Пусть $N = 10$ - общее количество скважин, по которым необходимо выполнить работы по бурению.

$M = 3$ - общее количество буровых бригад (ББ), одновременно участвующих в бурении. В качестве перемещаемых станков рассматриваются буровые установки (БУ).

Параметры модели выбраны таким образом, что более сложные скважины имеют большую длительность работ по бурению. Первая бригада является менее квалифицированной и ее услуги оплачиваются по меньшему тарифу. Третья бригада имеет наибольшую производительность, но ее услуги оплачиваются по максимальному временному тарифу.

Рассмотрим решение первой оптимизационной задачи («неупорядоченные расписания») для нашего примера (53049 - общее число возможных вариантов). На рисунке точками нанесен фрагмент всевозможных решений в координатах $T_{план}$ (ось OX) и $T_{план} + \bar{T}_{\Sigma}$ (ось OY).

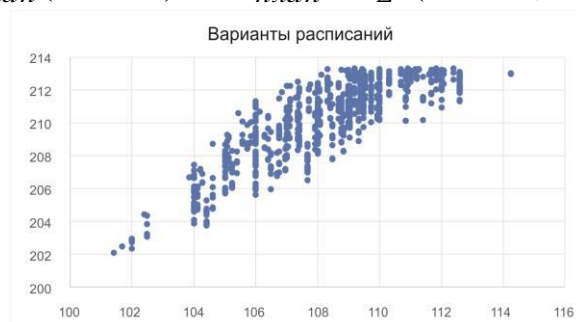


Рисунок 1. Всевозможные решения «первой оптимизационной задачи» (фрагмент множества).

Время выполнения плана у всех альтернативных решений незначительно отличается от минимаксного значения $T_{onm} = 101,4$, что указывает на предельно равномерное распределение скважин между ББ по суммарному времени выполнения планируемых работ.

Можно сделать следующие промежуточные выводы:

- Единственный вариант обеспечивает оптимальное (минимаксное) неупорядоченное расписание $T_{onm} = 101,4$, при этом соответствующая сумма с «трудоднями» является минимальной.

- Для дальнейшего анализа отобрано 4 варианта альтернативных расписаний, в которых отмечается довольно значимые перестановки скважин между буровыми бригадами.

- Рекомендация 1: «Самую сложную по времени и осложнениям скважину целесообразно отдать самой квалифицированной бригаде».

- Рекомендация 2: «Простую (без осложнений) и более длительную по времени скважину целесообразно сразу отдать менее квалифицированной бригаде».

- Если первоначально следовать разумным рекомендациям (1,2) и принудительно распределить скважины, то число вариантов уменьшится в 9 раз и составит 5894.

На втором этапе поиска зададим все начальные условия, а именно:

- $K = K_{\min} = 5$ - количество буровых установок;
- вектор времен начального «освобождения» ББ и БУ;
- матрица достижимости $D(15 * 15)$ между скважинами.

Расписание, соответствующее T_{onm} , имеет наилучшие варианты управления перебросками БУ. Другие альтернативные варианты неупорядоченных расписаний имеют худшие показатели.

По решению второй оптимизационной задачи можно сделать следующие промежуточные выводы:

- Получено два наилучших альтернативных решения задачи формирования непрерывного календарного плана работ, имеющие близкие интегральные характеристики.

- Порядки бурения скважин в отобранных альтернативных вариантах значимо отличаются друг от друга.

- Общее количество проанализированных вариантов (первая и вторая оптимизационная задача) составило суммарно всего 56505 (вместо 239,5 млн.).

- Упорядочивание строительства скважин по выбранным критериям приводит к отбору тех вариантов, у которых ББ, закончив бурение, как правило, переходит на другие площади месторождения. В свою очередь БУ целесообразно по возможности использовать на одних и тех же месторождениях. Данные рекомендации могут быть полезны при

«ручном» способе формирования расписаний работ по строительству скважин.

ВЫВОДЫ

1. Существующая практика непрерывного календарного планирования работ не реализует в полном объеме возможности централизованного оптимального распределения выделенных ресурсов.

2. Необходимо формировать и учитывать в календарном планировании текущий рейтинг исполнителей работ (бригад). Предложена мультипликативная модель расчета времени выполнения работы с учетом ее сложности и квалификации конкретной бригады.

3. Показано, что задача оптимизации распределения объемов работ между бригадами математически эквивалентна задаче оптимизации многопроцессорных вычислений с учетом особенностей предметной области.

4. Исследована задача на быстроедействие выполнения всех запланированных работ с учетом максимальной эффективности использования выделенных ресурсов.

5. Проведенные исследования и последующий структурный анализ позволили сформировать двухэтапный алгоритм поиска эффективных решений задач непрерывного календарного планирования.

ЛИТЕРАТУРА:

1. *Калянов Г.Н., Титов Н.Н., Шибeko В.Н. «Оптимизация распределения ресурсов буровой компании в условиях массового строительства скважин», сборник научных трудов Международной научно-практической конференции «Теория активных систем» (ТАС-2014), секция №3 «Управление проектами», 17-18 ноября 2014, ИПУ РАН, 104-108 стр.*

2. *Головкин Б.А. «Расчет характеристик и планирование параллельных вычислительных процессов», М. Радио и связь, 1983-272с.*

3. *Гончар Д.Р., Фуругян М.Г. «Эффективные алгоритмы планирования вычислений в многопроцессорных системах реального времени», М., Управление большими системами, выпуск 49, 2014, 269-296 стр.*

4. *Охорзин В.А. «Оптимизация экономических систем. Примеры и алгоритмы в среде Mathcad», М., изд-во «Финансы и статистика», 2005, 144 стр.*