

УДК 629.4

В.В. Скалозуб, А.А. Бардась, М.В. Скалозуб

О ПРИБЛИЖЕННОЙ ДЕКОМПОЗИЦИИ NP-ПОЛНЫХ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМИ СИСТЕМАМИ

Разработан приближенный метод последовательной декомпозиции дискретных оптимизационных задач управления сложными системами, которые могут быть реализованы многопараметрическими NP-полными переборными моделями поиска в пространстве состояний. В качестве примеров рассмотрены задачи по выбору порядка переработки составов поездов на последовательности сортировочных станций, когда минимизируются суммарные затраты на эксплуатацию всей транспортной системы, а также планирование ремонтов множества технических объектов на основе оценок их технического состояния.

Ключевые слова: NP-полные задачи, оптимизация, дискретные задачи управления, модель пространства состояний, декомпозиция, транспортная система, последовательность переработки составов, техническое состояние объектов.

Введение

Многочисленные практически важные задачи планирования и управления являются дискретными комбинаторными и решаются путем перебора (полного или на ограниченной части вариантов) [1, 2, 3, 7]. В задачах необходимо на некотором множестве найти элемент (последовательность элементов и др.), удовлетворяющий совокупности условий. Методы и алгоритмы решения поисковых задач многообразны [1, 4, 6], они включают также и методы эвристического поиска систем искусственного интеллекта [2, 3]. Эффективным алгоритмом решения поисковых задач в пространстве состояний является «А* алгоритм» [3]. В нем поисковые ситуации, состояния, оцениваются с помощью суммы двух функций – реальной оценки состояния и эвристической функции, оценивающей некоторую эвристическую величину, связанную с текущим состоянием. Заметим, что в терминах одного этапа «А* алгоритма» можно представить и двухэтапную задачу стохастического программирования [6], где эвристическая составляющая оценочной функции представлена вероятностными оценками ожидаемых ущербов при различных вариантах состояний (решений).

Двухэтапная модель как фрагмент декомпозиции исходной многопараметрической задачи далее используется при построении алгоритмов решения комбинаторных задач управления и оптимального планирования. Использование эвристических методов поисковой оптимизации вполне оправдано для реализации дискретных комбинаторных задач, поскольку они во многих практических случаях являются NP-полными [2], и не имеют более простых алгоритмов решения. В настоящее время получено доказательство эквивалентности обширного семейства переборных задач (теорема Кука) [2, 3].

В представленной работе развивается подход к построению приближенных решений на основе последовательной декомпозиции дискретных оптимизационных задач управления сложными системами, которые являются многопараметрическими NP-полными переборными моделями поиска в пространстве состояний. Декомпозиция общей модели исходной задачи выполняется на основе упорядоченной последовательности двухэтапных. При этом вводится дополнительное эвристическое ограничение условий перебора в форме некоторого *идеального состояния* или же условия, что также позволяет уменьшить число вариантов, которые необходимо оценить и сравнить. В общем плане предложенный метод является некоторой реализацией «А* алгоритма», ориентированного на решение NP-полных комбинаторных задач оптимального планирования процессов эксплуатации транспортных систем.

Примером NP-полной задачи является управление очередностью роспуска составов на сортировочных станциях. Актуальность этой задачи в том, что она исследует один из главных резервов повышения эффективности железнодорожных перевозок и уменьшения сроков доставки грузов. Он состоит в сокращении продолжительности нахождения вагонов на технических станциях. Анализ распределения времени нахождения вагонов на сортировочных станциях показывает, что здесь основной составляющей является срок накопления вагонов в сортировочном парке. Здесь наиболее существенным фактором является ожидание поступления вагонов «замыкающей группы», которые завершают накопление состава. Длительность ожидания вагонов «замыкающей группы» можно сократить за счет выбора очередности роспуска составов, чтобы обрабатывать составы с

«замыкающими группами» вагонов без непроизводительных простоев.

Постановка задачи по выбору очередности обработки транспортных объектов

Задача выбора очередности расформирования составов (ВОРС) состоит в следующем. На сортировочную станцию прибывает некоторый поток поездов, для которого известны структуры поездов и данные о сроках их прибытия на станцию. Необходимо при установленных требованиях к процессу перевозок и ограничениях характеристик сортировочной станции выбрать такую очередность расформирования поездов, чтобы общие эксплуатационные расходы на расформирование-формирование транспортной системы в целом были минимальными. Исходными данными для решения задачи выступают [8]: сведения о поездах, которые могут быть расформированы станцией на протяжении определенного периода времени; наличие вагонов, находящихся на путях сортировочного парка на момент начала расчета; емкость сортировочных путей; количество и специализация путей в парке прибытия; расчетные нормативы времени для выполнения операций технологического процесса в парках станции.

При решении задачи управления расформированием-формированием используют следующие критерии: K_1 – минимум общей продолжительности простоя поездов в ожидании приема на станцию; K_2 – минимум простоя приоритетных вагонопотоков; K_3 – минимум общих эксплуатационных расходов, связанных с простоем вагонов на станции и маневровой работой по расформированию-формированию поездов.

Отметим, что комбинаторный характер задачи ВОРС приводит к необходимости полного перебора вариантов последовательности роспуска, что на практике оперативно не может быть реализовано. В работе предложено преобразование n -компонентной задачи в последовательность 2-х этапных, 2-х компонентных задач [6]. При этом схема выбора варианта дополнена функцией – определение идеальной последовательности роспуска (ИПР). За счет этого может быть уменьшено количество вариантов очередности и сокращен перебор в n -компонентной задаче ВОРС. Также показано, что модели

ИПР могут быть разными, и решение о применении той или иной из них выбирается в зависимости от оперативной ситуации на станции.

Анализ системы критериев эффективности процессов расформирования-формирования составов

Очередность расформирования составов существенно влияет на структуру поездов своего формирования, следовательно, и на объемы и условия маневровой работы на следующих технических станциях. Поэтому введем показатель (и соответствующий критерий) K_4 – структура поездов своего формирования. Принимается, что критерии согласуются между собой следующим лексикографическим (обозначенным через « $\geq$ ») [5] образом:

$$K_1 \geq K_2 \geq K_3 \geq K_4 \quad (1)$$

Так как необходимо обеспечить бесперебойный прием поездов на станцию, то первоочередным выбран критерий минимума общего простоя поездов по неприему. Среди множества решений, обеспечивающих реализацию K_1 , проводится поиск решений по критерию минимума простоя вагонов на станции. При этом если есть специальное задание на первоочередное отправление определенных категорий вагонопотоков (например порожних вагонов), то применяется критерий K_2 , далее выполняется поиск по критерию K_3 . Наконец, среди множества решений, обеспечивающих выполнение первых трех критериев, проводится поиск последовательностей роспуска составов, улучшающих структуру поездопотоков своего формирования. Множество решений по лексикографическим упорядочениям может быть расширено с использованием метода последовательных уступок [5].

Каждый вариант переработки составов на станции будем характеризовать выбранной последовательностью расформирования $X^{(t)}$, рис.1.

Для постановки задачи достижения максимально возможной длины отцепов (последовательности вагонов, следующих в одном направлении) в составах, формируемых на станции, критерий задачи ВОРС имеет вид:

$$C_{\text{відч}} = \sum_{i=1}^N m_i \longrightarrow \min_{X^{(t)}}, \quad (2)$$

где m_i – количество отцепов в i -м сформированном составе;
 N – количество сформированных составов за заданный период;
 $X^{(t)}$ – последовательность расформирования составов.

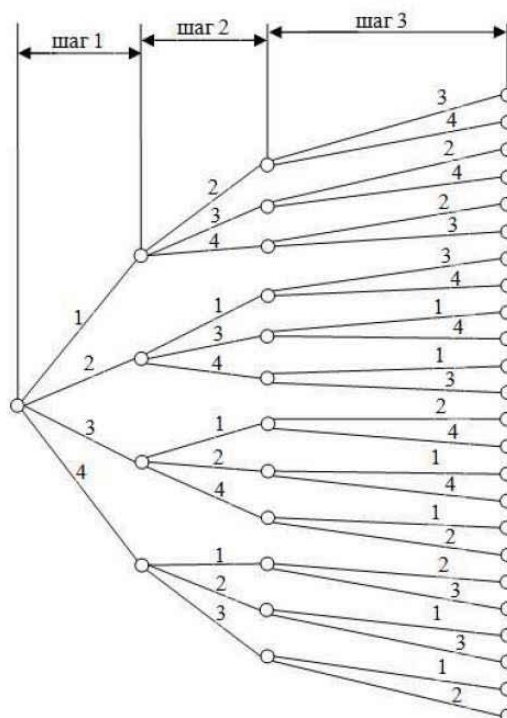


Рисунок 1 - Граф возможных вариантов очередности расформирования составов

Поскольку вагоны, отправляющиеся в поездах своего формирования, в последующем могут обслуживаться не на одной, а на нескольких технических станциях, то под одним отцепом будем понимать не «фактический» отцеп на следующей технической станции, а совокупность вагонов, размещенных последовательно и имеющих общую станцию назначения. Благодаря этому происходит улучшение условий работы всех последующих технических станций на пути следования вагонов.

Существующие методики ВОРС используют прогноз прибытия поездов в виде детерминированной величины. Это является определенным недостатком, поскольку на практике имеют место значительные отклонения фактических моментов прибытия от прогнозируемых. В работе разработан алгоритм, позволяющий решать задачу в условиях статистической неопределенности данных. Исследование выполнялось на имитационной модели подсистемы расформирования станции Нижнеднепровск-Узел, при этом использован комбинаторный метод ВОРС.

Для учета влияния неточности прогноза прибытия поездов были приняты исходные данные натурных обследований, представленных гистограммой, характеризующей вероятности различных времен

отклонения в прибытии поездов. Каждый поезд, прибывающий на станцию, может быть принят в парк приема с отклонением от прогноза. Учитывая все возможные комбинации вариантов опоздания поездов, была получена совокупность возможных состояний $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_s)$, характеризующих условия реализации варианта последовательности $X^{(i)}$, для которых известны вероятности $\{p(\theta_i)\}_s$.

С учетом множества возможных состояний $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_s)$ модель задачи ВОРС имеет следующий вид:

$$C^* = M[C(X^{(i)}, \theta_i)] \rightarrow \min \quad (3)$$

где $C(X^{(i)}, \theta_i)$ – расходы на реализацию последовательности $X^{(i)}$ с учетом возможного состояния θ_i .

Математическое ожидание затрат на процессы поездообразования определяется следующим образом:

$$M[C(X^{(i)}, \theta_i)] = \sum_{i=1}^s C(X^{(i)}, \theta_i) \cdot p(\theta_i) \quad (4)$$

При такой постановке задачи дерево вариантов имеет вид, приведенный на рис 1, 2. Общее дерево вариантов разбивается на отдельные поддеревья. В рассматриваемом примере общее дерево вариантов глубиной в три состава разбивается на основное дерево вариантов глубиной в один состав и дополнительные деревья глубиной по два состава. Выполняется сравнение вариантов основного дерева, дополнительные деревья вариантов служат для более точной оценки вариантов основного дерева.

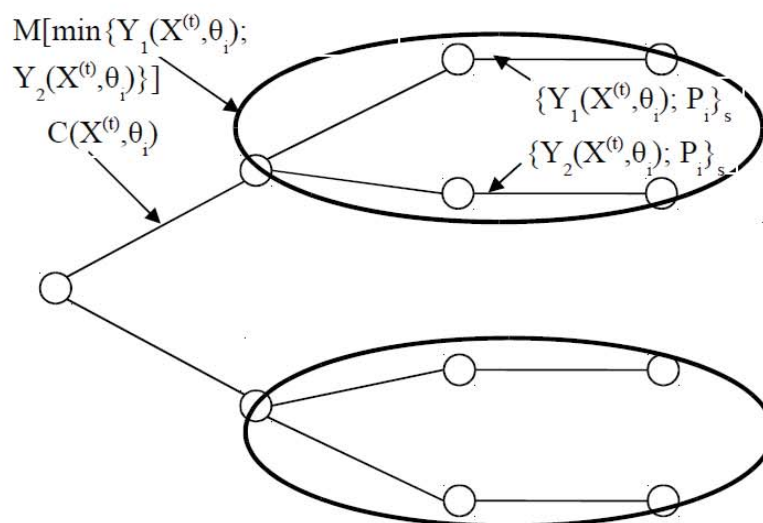


Рисунок 2 - Граф возможных вариантов очередности роспуска в случае декомпозиции задачи

Каждый вариант основного дерева оценивается расходами $C(X^{(i)}, \theta_i)$, варианты дополнительного дерева оцениваются затратами $Y_j(X^{(i)}, \theta_i)$. Модель 2-х этапной задачи имеет вид:

$$C^* = M[C(X^{(i)}, \theta_i) + \min\{Y_j(X^{(i)}, \theta_i)\}] \rightarrow \min \quad (5)$$

где $j=1..n$ – номер варианта дополнительного дерева

Было выполнено исследование эффективности решения задачи ВОРС при разном количестве составов M_1 , включаемых в основное дерево вариантов для разного общего количества составов m , принимающих участие в расчете. Если $M_1=m$, то имеет место полный перебор вариантов. Результаты исследования представлены на рис. 3. Как следует из графика, эффективность задачи ВОРС в случае ее декомпозиции несколько снижается. Но при этом сокращается продолжительность расчета по выбору рациональной последовательности.

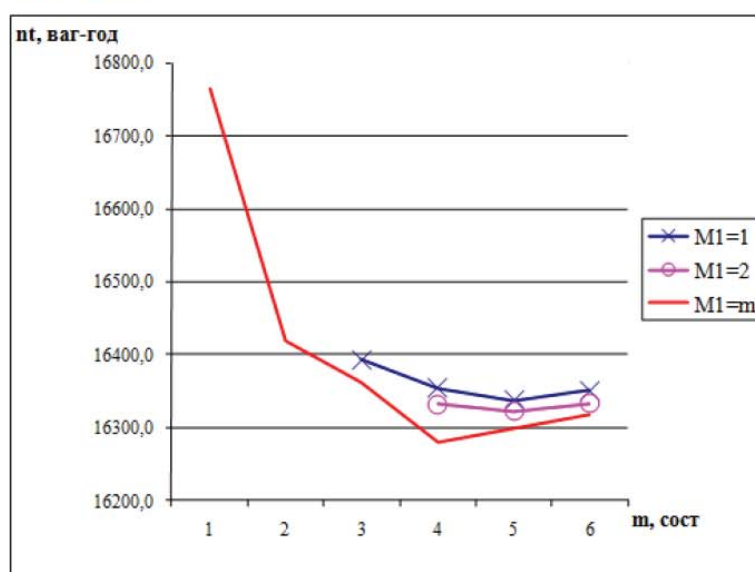


Рисунок 3 - Зависимость затрат вагоно-часов простоя от глубины планирования

Понятие идеальной последовательности обработки (ропуска) составов

Отметим, что комбинаторный характер задачи ВЧРС приводит к необходимости полного перебора вариантов последовательности ропуска, что на практике не может быть реализовано. Для сокращения объема расчетов, связанных с анализом вариантов очередности ропуска, определим максимальное положительное влияние последовательности ропуска на показатели работы станции.

На основе оценки этого влияния формулируется понятие идеальной последовательности роспуска ИПР – последовательности обработки, обеспечивающей такие теоретически возможные показатели работы, которые нельзя улучшить. Рассмотрим понятие идеальной последовательности на примере критерия минимизации простоя вагонов на станции. Возьмем случай обработки состава с «закрывающей группой вагонов» в парке приема. При этом выполняется также накопление вагонов одного назначения в сортировочном парке. Пусть перед роспуском состава в сортировочном парке находится m_c вагонов. В результате роспуска состава на данное назначение поступает «закрывающая группа вагонов» m_r , при этом $m_c + m_r \geq m$, где m – число вагонов в составе поезда. Имеется два варианта обработки состава – с непродуктивными простоями в парке приема и без них. Определим оценку сокращения срока простоя вагонов на станции в случае обработки составов без непроизводительных простоев.

Величина сокращения простоя вагонов Δn_t равна:

$$\Delta n_t = \Delta t \cdot (m_c \tilde{m}_{\text{зал}}), \quad (6)$$

где $\tilde{m}_{\text{зал}}$ – вагоны на сортировочных путях после перестановки накопленного состава в парк отправления. Величина сокращения простоя вагонов «закрывающей группы» в парке приема составляет $\Delta n_t = \Delta t \cdot m_r$.

Из уравнений получаем

$$\Delta n_t = \Delta t \cdot (m_c \tilde{m}_{\text{зал}}) + \Delta t \cdot m_r = \Delta t \cdot (m_c + m_r \tilde{m}_{\text{зал}}) \quad (7)$$

Учитывая, что $m_c + m_r \tilde{m}_{\text{зал}} = m$, имеем: $\Delta n_t = \Delta t \cdot m_c$. Значение Δn_t зависит от двух факторов – числа вагонов в составе поезда m , здесь не изменяется, и от величины Δt – сокращение непроизводительных простоев составов с «закрывающими группами» в парке приема. Отсюда возникает понятие идеальной последовательности роспуска (ИПР) – такой последовательности, что обеспечивает обработку и расформирования составов с «закрывающими группами» без непроизводительных простоев. Покажем возможность сокращения числа вариантов анализа очередности роспуска при использовании понятия ИПР.

На рис. 4 приведен пример обработки трех составов в парке приема. Считается, что второй состав имеет одну «закрывающую группу», а остальные – их не имеют. Рассмотрим возможные

варианты очередности обработки составов с выбором наилучшего. При трех составах имеем 6 вариантов очередности роспуска. Анализ начинается с последовательности 1-2-3 (соответствует принципу FIFO [4]). Далее перебираются все варианты, заканчивая последовательностью 3-2-1 (соответствует принципу LIFO [4]). Для варианта 1-2-3 единственный состав с «завершающей группой» задерживается на величину времени Δt , характеристики этой последовательности можно улучшить. Следующий вариант, 1-3-2. При такой последовательности, рис. 4, имеются еще большие задержки, и избирается третий вариант 2-1-3. В нем состав с завершающей группой обрабатывается в парке приема без непроизводительных простоев. Кроме того, последний состав последовательности расформировывается также без задержек и поэтому не ухудшает условия работы в парке приема после реализации выбранной последовательности (обработка составов 4, 5 и т.д.). Итак, последовательность обработки 2-1-3 является идеальной и не может быть улучшена и оценку остальных вариантов можно не определять.

Понятие ИПС учитывает простой вагонов только на момент завершения накопления, минимизировать же нужно простой вагонов на станции в целом. Сформулируем другое понятие ИПР как последовательности, которая обеспечивает отсутствие простоя поездных локомотивов в ожидании сформированного состава. Решение о применении первого или второго понятия ИПС зависит от оперативной ситуации на момент планирования. Если в наличии достаточное количество поездных локомотивов, то следует использовать первое понятие, максимально ускоряя процесс накопления вагонов. Если нет поездных локомотивов, то следует использовать второе понятие ИПР, учитывая ситуацию в парке отправления. При использовании второго понятия ИПС появляются дополнительные резервы для улучшения структуры поездов своего формирования по критерию K_4 .

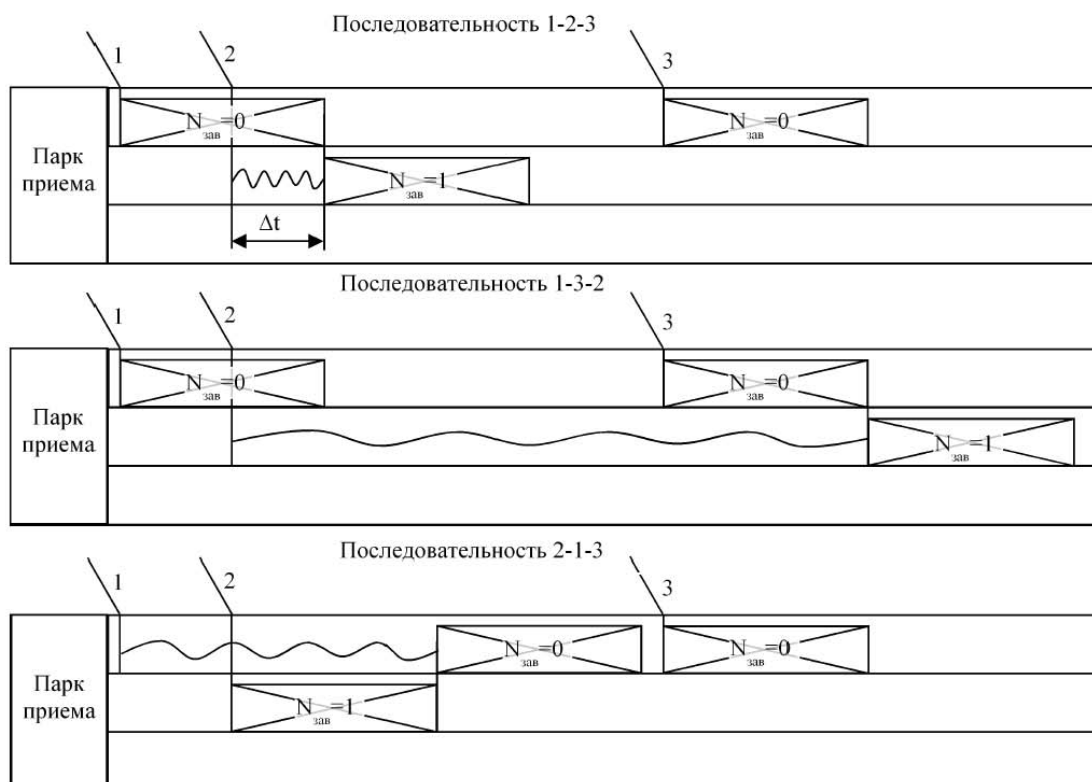


Рисунок 4 - Пример использования понятия идеальной последовательности обработки составов при анализе вариантов их расформирования

Выводы

В работе построен приближенный метод последовательной декомпозиции дискретных комбинаторных задач управления сложными системами. В качестве примера рассмотрена задача выбора очередности обработки составов поездов на сортировочных станциях. В задаче расформирования-формирования составов на основе декомпозиции усовершенствован метод выбора очередности роспуска. При этом выполнен анализ системы критериев решения задачи, установлен их лексикографический порядок. Введен новый показатель, оценивающий структуры поездов своего формирования. Сформулировано понятие идеальной последовательности роспуска, с использованием которого возможно сокращение количества вариантов очередности переработки составов. Предложенные алгоритмы позволяют выполнить эффективную декомпозицию n -этапной задачи расформирования n составов на последовательность 2-этапных.

В качестве другой задачи отмечено планирование ремонтов множеств технических объектов (электрических приводов железнодорожных стрелочных переводов) на основе оценок их технического состояния.

ЛИТЕРАТУРА

1. Исследование операций: В 2-х томах. /Под ред. Дж. Моудера, С. Элмаграби. – М.: Мир, 1981. Т. 1. 712 с.
2. Лорьер Ж.Л. Системы искусственного интеллекта. – М.Мир, 1991. – 568 с.
3. Luder G.F. Artificial intelligence. – Redbook: The Benjamin Publishing Company Inc. 1993. – 738 p.
4. Кузин Л.Т. Основы кибернетики. – М.: Энергия, 1979. – 584 с.
5. Подиновский В.В., Гаврилов В.М. Оптимизация по последовательно применяемым критериям. – М.: Советское Радио, 1975. – 146 с.
6. Ермольев Ю.М., Ляшко И.И., Михалевич В.С., Тюптя В.И. Математические методы исследования операций. – К.: Вища школа, 1979. – 312 с.
7. Кузнецов О.П. Дискретная математика для инженера. – М.: Энергоатом издат, 1988. – 480 с.
8. Буянов В.А., Ратин Г.С. Автоматизированные информационные системы на железнодорожном транспорте. М.: Транспорт, 1984. – С. 72-74.