

УДК 519.854.2

**ИЕРАРХИЧЕСКОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ В СИСТЕМАХ,
ИМЕЮЩИХ СЕТЕВОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ОГРАНИЧЕННЫЕ
РЕСУРСЫ, КАК ЗАДАЧА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ**

М.З. ЗГУРОВСКИЙ, А.А. ПАВЛОВ

Исследуется проблема эффективного планирования в системах с сетевым представлением технологических процессов и ограниченными ресурсами. Обосновывается использование иерархических моделей планирования. Показано, что даже эффективное решение задачи по одному скалярному критерию является лишь начальным этапом реализации эффективного планирования как задачи принятия решений с плохо формализованной глобальной целью.

Эффективное планирование в системах с сетевым представлением технологий и ограниченными ресурсами требует применения системных концепций планирования и управления. Действительно, в классической постановке эффективное планирование — это нахождение расписания выполнения работ, которому соответствует минимум некоторого функционала с учетом ограничений, задаваемых сетевым представлением технологического процесса. Точная математическая модель такой задачи — многоэтапная задача календарного планирования. Размерность реальных сетевых систем приводит к трансвычислительной сложности обработки информации [1].

Известные эвристические методы решения многоэтапных задач календарного планирования проблему трансвычислительной сложности решают ценой качества (они основаны на линейной или случайной комбинации различных правил предпочтения и оптимизации на шаг вперед, что не гарантирует качества полученного решения). Многие исследователи к проблеме эффективного планирования в сетевых системах подходят в первую очередь как к проблеме планирования дискретного производства — мелкосерийного (80% мирового производства), производства на заказ и т.д.

В такой постановке задача характеризуется системной сложностью [1] и решается [2, 3] с использованием принципов экономической, технологической, эргономической, информационной рациональности [1]. В работе [12] с учетом органической связи системной и вычислительной сложности обсуждаемой проблемы сформулированы и обоснованы требования к математическому обеспечению эффективного планирования в сетевых системах.

1. Реализация прогрессивной организации производства.
2. Иерархичность планирования.
3. Агрегация и дезагрегация как реализация иерархического планирования.
4. Многокритериальность — умение в условиях жесткой рыночной конкуренции эффективно реализовывать расписания по критериям (выполнение заказов точно в срок), максимизация прибыли, минимизация суммарного штрафа как за опережение, так и за запаздывание заданий относительно директивных сроков и т.д.
5. Модульность алгоритмического обеспечения — выделение общих алгоритмических блоков базовых алгоритмов для решения различных задач и их комбинирование на основе очевидного конструктивного анализа с целью эффективного системного проектирования алгоритмов.
6. Универсальность алгоритмического обеспечения — возможность легко перестраиваться с одного критерия на другой, включать дополнительные ограничения, адаптироваться к планированию различных объектов управления. Реализация планирования функционирования сложных объектов путем создания системы новых высокоэффективных взаимосвязанных алгоритмов на основе единой логики решения задач по различным критериям оптимальности, что позволит эффективно решать задачи планирования в комплексе.
7. Использование эффективных точных и приближенных методов решения оптимизационных задач планирования, модели которых являются различного вида труднорешаемыми задачами комбинаторной оптимизации. Математическое обеспечение системы должно содержать современные теоретические достижения в области решения рассматриваемых труднорешаемых комбинаторных задач планирования.
8. Адекватность реальному производству в его сложности и многообразии. Модель планирования должна отражать ограниченность ресурсов, фактическую загрузку оборудования, взаимосвязь между операциями в технологическом процессе, большое количество разнообразных производственных связей, конструкторскую сложность продукции, неравномерность количественного выпуска изделий по плановым периодам, неодновременность поступления заданий на выполнение и другие особенности производства.

В работах [9, 14, 18, 19] предложена трехуровневая модель планирования в сетевых системах с ограниченными ресурсами, основанная на изложенных выше принципах.

Трехуровневая модель решает следующие задачи.

Задача 1. Критерий оптимальности — максимизация суммарной прибыли предприятия в случае отсутствия директивных сроков

$$\min \sum_{i=1}^n \omega_i C_i,$$

где C_i — время выполнения i -го изделия.

Задача 2. Для всех изделий $i \in I$ введены директивные сроки D_i , которые не могут быть нарушены (планирование «точно в срок»). Критерий оптимальности

$$\max \sum_{i=1}^n \omega_i U_i,$$

где $U_i = \begin{cases} 1, & C_i = D_i, \\ 0, & C_i \neq D_i. \end{cases}$

Задача 3. Для некоторых изделий $i \in I$ заданы директивные сроки, которые не могут быть нарушены. Для остальных изделий $D_i = 0$. Критерий оптимизации

$$\min \sum_{i=1}^k \omega_{i_j} C_{i_j},$$

где $\{i_1, \dots, i_k\}$ — множество номеров заданий, для которых отсутствуют директивные сроки.

Задача 4. Для всех изделий $i \in I$ введены директивные сроки D_i . Необходимо изготовить n изделий, минимизируя суммарное взвешенное опоздание изготовления изделий относительно директивных сроков

$$\min \sum_{i=1}^n \omega_i \max(0, C_i - D_i).$$

Задача 5. Постановка задачи соответствует постановке задачи 4. Введено дополнительное условие: для некоторых изделий директивные сроки не могут быть нарушены. Критерий оптимальности

$$\min \sum_{j=1}^k \omega_{i_j} \max(0, C_{i_j} - D_{i_j}),$$

где $\{i_1, \dots, i_k\}$ — множество номеров заданий, для которых разрешается нарушать директивные сроки.

Задача 6. Для всех изделий $i \in I$ введены директивные сроки D_i . Для каждого изделия указана величина ω_i — абсолютная прибыль от реализации изделия, не зависящая от момента окончания выполнения изделия в том случае, если оно выполняется без опоздания относительно директивного срока, иначе прибыль предприятия по этому изделию равна нулю. Критерий оптимальности — максимизация суммарной прибыли предприятия

$$\max \sum_{i=1}^n \omega_i U_i,$$

где $U_i = \begin{cases} 1, & C_i \leq D_i, \\ 0, & C_i > D_i. \end{cases}$

Задача 7. Для всех изделий заданы директивные сроки D_i . Необходимо минимизировать суммарный штраф предприятия как за опережение, так и за опоздание относительно директивных сроков

$$\min \sum_{i=1}^n \omega_i |C_i - D_i|.$$

На первом уровне система агрегируется в задачу календарного планирования с одним станком и показателем качества задачи 1, у которой веса определяются содержательной постановкой задач 1–7. Ограничения на порядок выполнения работ задаются ориентированным ациклическим графом. Граф построен на критических путях, определенных сетевым представлением технологических процессов. Иными словами, на первом уровне решается NP-трудная в сильном смысле задача комбинаторной оптимизации — «минимизация суммарного взвешенного момента окончания выполнения работ при ограничениях на порядок их выполнения, заданных ориентированным ациклическим графом». Задача 1 с учетом агрегации строго решается эффективным точным ПДС-алгоритмом [5]. Алгоритмы для задач 2–7 являются эвристическими с обоснованными эффективными эвристиками.

Решение модели первого уровня определяет субоптимальные приоритеты выполнения групп работ. Модели второго и третьего уровня на основе этих приоритетов путем последовательной дезагрегации строят согласованный календарный план выполнения работ, учитывающий ограничения на ресурсы, сетевое представление технологического процесса и критерий оптимальности.

Таким образом, общая многоэтапная модель календарного планирования заменяется последовательностью дискретных математических моделей, совместимых с иерархией решений, которые должны быть приняты на каждом уровне планирования, а также порожденных ими систем новых высокоэффективных взаимосвязанных алгоритмов решения задач планирования по различным критериям оптимальности. Этот подход позволяет использовать на разных уровнях иерархии эффективные точные ПДС-алгоритмы для одноэтапных задач календарного планирования [5, 10, 14, 17, 24]. Предложенная трехуровневая модель планирования реализует стратегию поиска глобального оптимума, что позволяет получать решения, близкие к оптимальным.

Более глубокий анализ процедуры эффективного планирования в реальных сетевых системах с ограниченными ресурсами показывает, что на самом деле лицо, принимающее решение (ЛПР), определяет качество расписания работ не по одному, пусть и наиболее важному, критерию, а по их совокупности [11], общее количество которых превышает 40 [22, 23]. Поэтому возможность получать по различным скалярным критериям с помощью трехуровневой модели планирования близкие к оптимальным расписания работ нельзя считать завершающим этапом планирования.

Действительно, каждое расписание становится альтернативой, которая оценивается ЛПР по всей совокупности критериев. Возникает задача выбора наилучшей альтернативы в соответствии со слабо формализованной глобальной целью.

Решение проблемы эффективного планирования в сетевых системах с ограниченными ресурсами оказалось напрямую связанным с решением системной проблемы отсутствия однозначной формализации задачи [1]. Метод анализа иерархий Саати [20, 21, 26] является одним из наиболее эффектив-

ных методов разрешения сформулированной выше системной неопределенности, однако имеет одно существенное ограничение: он конструктивен только для случая хорошо обусловленных матриц парных сравнений малой размерности. Этого недостатка лишен модифицированный метод анализа иерархий [6–8], где веса объектов определяются на основании решений специальным образом сформулированных задач оптимизации.

Более того, если все критерии, по которым оценивается расписание, имеют численное выражение, то найденные модифицированным методом анализа иерархий результирующие веса альтернатив могут использоваться для нахождения функции принятия решений, т.е. для формализации глобальной цели [4, 15, 16].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследована с позиций системной и алгоритмической трансвычислительной сложности проблема эффективного планирования в системах, имеющих сетевое представление технологических процессов и ограниченные ресурсы.

Основываясь на принципах рациональности преодоления трансвычислительной сложности предложена и обоснована иерархическая модель планирования и ее алгоритмическое обеспечение.

Показано, что решение в классической постановке задачи планирования как многоэтапной задачи календарного планирования является лишь начальным этапом задачи принятия решений, формализация которой приводит к использованию модифицированного метода анализа иерархий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Згуровський М.З., Панкратова Н.Д. Основи системного аналізу. — Київ: Видавнича група ВНУ, 2007. — 544 с.
2. IT-Предприятие®: система полного цикла автоматизации. — <http://www.it.ua>.
3. Котлер Ф. Основы маркетинга: Пер. с англ. / Под общ. ред. Е.М. Пеньковой. — М.: Прогресс, 1990. — 736 с.
4. Павлов А.А., Иванова А.А., Чеховский А.В. Восстановление функции принятия решения с использованием модифицированного метода анализа иерархий // Вестн. НТУ «ХПИ»: Системный анализ, управление и информационные технологии. — 2009. — № 4. — С. 17–23.
5. Конструктивные полиномиальные алгоритмы решения индивидуальных задач из класса NP / А.А. Павлов и др. // Киев: Техніка, 1993. — 128 с.
6. Павлов А.А., Кут В.И. Математические модели оптимизации для обоснования и нахождения весов объектов по неоднородным матрицам парных сравнений // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2007. — № 3. — С. 28–37.
7. Павлов А.А., Лищук Е.И., Кут В.И. Математические модели оптимизации для обоснования и нахождения весов объектов в методе парных сравнений // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2007. — № 2. — С. 13–21.
8. Павлов А.А., Лищук Е.И., Кут В.И. Многокритериальный выбор в задаче обработки данных матрицы парных сравнений // Вісн. НТУУ «КПІ»: Інформатика, управління та обчислювальна техніка. — 2007. — № 46. — С. 84–88.
9. Организационная модель планирования мелкосерийного производства в условиях рынка / А.А. Павлов и др. // Проблемы информатизации и управления: Сб. науч. тр. — Киев: КМУГА, 1997. — С. 3–5.

10. Павлов А.А., Мисюра Е.Б. Эффективный точный ПДС-алгоритм решения задачи о суммарном запаздывании для одного прибора // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2004. — № 4. — С. 30–59.
11. Математические модели иерархического планирования и принятия решений / А.А. Павлов и др. // Вісн. НТУУ «КПІ»: Інформатика, управління та обчислювальна техніка. — 2008. — № 48. — С. 63–66.
12. Требования к созданию систем производственного планирования и управления сложными объектами, имеющими сетевое представление технологических процессов и ограниченные ресурсы / А.А. Павлов и др. // Вісн. НТУУ «КПІ»: Інформатика, управління та обчислювальна техніка. — 2007. — № 46. — С. 3–12.
13. Общая модель и методы иерархического планирования функционирования сложных организационно-производственных систем с ограниченными ресурсами / А.А. Павлов и др. // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2005. — № 4. — С. 7–23.
14. Павлов А.А., Теленик С.Ф. Информационные технологии и алгоритмизация в управлении // Киев: Техніка. — 2002. — 344 с.
15. Павлов А.А., Чеховский А.В. Построение многомерной полиномиальной регрессии. Активный эксперимент с ограничениями // Вестн. НТУ «ХПИ»: Системный анализ, управление и информационные технологии. — 2009. — № 4. — С. 174–186.
16. Павлов А.А., Штанькевич А.С. Восстановление закономерности по результатам пассивного эксперимента с ограниченным набором данных // Вестн. НТУ «ХПИ»: Системный анализ, управление и информационные технологии. — 2009. — № 4. — С. 160–169.
17. Павлов О.А., Аксьонова Л.О. Мінімізація сумарного зваженого моменту закінчення робіт як перший рівень моделі дрібносерійного виробництва та способи її розв'язання // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2002. — № 1. — С. 119–130.
18. Багаторівнева система планування дрібносерійного виробництва в умовах ринку / О.А. Павлов та ін. // П'ята укр. конф. з автоматичного управління «Автоматика-98». — Ч.ІІ. — Київ: НТУУ «КПІ», 1998. — С. 182–186.
19. Павлов О.А., Мисюра О.Б., Мельников О.В. Загальна схема розв'язання задач в багаторівневій системі планування дрібносерійного виробництва в умовах ринку // Вісн. НТУУ «КПІ»: Інформатика, управління та обчислювальна техніка. — 2000. — № 33. — С.27–33.
20. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий: Tomas Saaty. The Analytic Hierarchy Process: Пер. с англ. Р.Г. Вачнадзе. — М.: Радио и связь, 1993. — 315 с.
21. Саати Т., Кернс К. Аналитическое планирование. Организация систем: Пер. с англ. Р.Г. Вачнадзе / Под ред. И.А. Ушакова. — М.: Радио и связь, 1991. — 223 с.
22. Тоценко В.Г. Методы и системы поддержки принятия решений. Алгоритмический аспект. — Киев: Наук. думка. — 2002. — 381 с.
23. Finke G., Gordon V., Proth J.-M. Scheduling with due dates (Annotated Bibliography of complexity and algorithms) // Les cahiers du laboratoire Leibniz. — 2002. — № 42. — 58 p.
24. Koulamas C. The total tardiness problem: review and extensions // Operations Research. — 42, № 6. — P. 1025–1041.
25. Research efficiency of exact of PDS-algorithm of task of minimization of the total delay implementation of tasks by one device / А.А. Pavlov et al. // Committee on Data for Science and Technology CODATA'08: 21st International CODATA Conference (October 5–8, 2008, Kyiv, Ukraine). — P. 338–342.
26. Saaty T.L. Multycriteric decision making. The Analytic Hierarchy Process, McGraw Hill International. — N.Y., 1980. Translated to Russian, Portuguese, and Chinese. Revised edition, Paperback. — Pittsburgh, PA: RWS Publications, 1990, 1996. — 437 p.

Поступила 10.04.2009